



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Datenbericht Teil 2 von 4
**Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG
und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien
gemäß § 24 StandAG**

(Untersetzende Unterlage des Zwischenberichts Teilgebiete)

Stand 28.09.2020

Hinweis:

Vorliegender Datenbericht zeigt alle entscheidungserheblichen Daten, die mit Stand 07.09.2020 gemäß den Regelungen und Verfahren nach dem Geologiedatengesetz veröffentlicht werden können. Siehe auch Teil 3 von 4.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	26
Glossar	29
1 Bundeslandspezifische Modellierprotokolle	30
1.1 Steinsalz in steiler Lagerung	30
1.1.1 Brandenburg und Berlin	30
1.1.2 Mecklenburg-Vorpommern	41
1.1.3 Niedersachsen, Bremen und Hamburg	53
1.1.4 Sachsen-Anhalt	72
1.1.5 Schleswig-Holstein	87
1.2 Stratiformes Steinsalz	97
1.2.1 Zechstein – Brandenburg	97
1.2.2 Zechstein – Hessen	109
1.2.3 Zechstein – Mecklenburg-Vorpommern	121
1.2.4 Zechstein – Niedersachsen, Bremen, Hamburg	134
1.2.5 Zechstein – Nordrhein-Westfalen	150
1.2.6 Zechstein – Sachsen-Anhalt	164
1.2.7 Zechstein – Schleswig-Holstein	178
1.2.8 Zechstein – Thüringen, Bayern	189
1.2.9 Oberer Buntsandstein – Mecklenburg-Vorpommern	209
1.2.10 Oberer Buntsandstein – Niedersachsen, Bremen, Hamburg	218
1.2.11 Oberer Buntsandstein – Schleswig-Holstein	233
1.2.12 Mittlerer Muschelkalk – Baden-Württemberg	245
1.2.13 Mittlerer Muschelkalk – Mecklenburg-Vorpommern	257
1.2.14 Mittlerer Muschelkalk – Niedersachsen, Bremen, Hamburg	266
1.2.15 Mittlerer Muschelkalk – Schleswig-Holstein	282
1.2.16 Mittlerer Keuper – Mecklenburg-Vorpommern	294
1.2.17 Mittlerer Keuper – Niedersachsen, Bremen, Hamburg	301
1.2.18 Mittlerer Keuper – Sachsen-Anhalt	313
1.2.19 Mittlerer Keuper – Schleswig-Holstein	321
1.2.20 Oberjura – Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen	332
1.2.21 Tertiär, Wittelsheim-Fm. – Baden-Württemberg	344
1.3 Tongestein	354
1.3.1 Karbon, Ziegelschiefer-Fm. – Nordrhein-Westfalen	354
1.3.2 Rotliegend, Meisenheim-Fm. und Standenbühl-Fm. – Saarland, Rheinland-Pfalz	364

1.3.3	Buntsandstein, Calvörde-Fm. – Thüringen, Sachsen-Anhalt	373
1.3.4	Buntsandstein, Röt-Fm. – Hessen	379
1.3.5	Keuper – Niedersachsen, Bremen, Hamburg	387
1.3.6	Keuper – Schleswig-Holstein	396
1.3.7	Keuper – Thüringen	405
1.3.8	Unterjura – Brandenburg, Berlin	411
1.3.9	Unterjura – Niedersachsen, Bremen, Hamburg	425
1.3.10	Unterjura – Nordrhein-Westfalen	440
1.3.11	Unterjura – Mecklenburg-Vorpommern	454
1.3.12	Unterjura – Rheinland-Pfalz	466
1.3.13	Unterjura – Sachsen-Anhalt	471
1.3.14	Unterjura – Schleswig-Holstein	485
1.3.15	Mittlerer Jura – Brandenburg, Berlin	499
1.3.16	Mittlerer Jura – Niedersachsen, Bremen, Hamburg	513
1.3.17	Mittlerer Jura – Nordrhein-Westfalen	528
1.3.18	Mittlerer Jura – Mecklenburg-Vorpommern	541
1.3.19	Mittlerer Jura – Sachsen-Anhalt	553
1.3.20	Mittlerer Jura, Opalinuston-Fm. – Bayern	567
1.3.21	Mittlerer Jura, Opalinuston-Fm. – Baden-Württemberg	580
1.3.22	Oberjura, Kandern-Fm. – Baden-Württemberg	594
1.3.23	Unterkreide – Brandenburg, Berlin	598
1.3.24	Unterkreide – Niedersachsen, Bremen, Hamburg	614
1.3.25	Unterkreide – Nordrhein-Westfalen	636
1.3.26	Unterkreide – Mecklenburg-Vorpommern	656
1.3.27	Unterkreide – Sachsen-Anhalt	671
1.3.28	Unterkreide – Schleswig-Holstein	690
1.3.29	Oberkreide – Bayern	707
1.3.30	Oberkreide – Brandenburg, Berlin, Sachsen	718
1.3.31	Oberkreide – Niedersachsen, Bremen, Hamburg	731
1.3.32	Oberkreide – Nordrhein-Westfalen	741
1.3.33	Tertiär – Begründung der Nichtberücksichtigung von einigen tertiären Tonformationen Deutschlands	752
1.3.34	Tertiär, Unterpaläozän – Brandenburg, Berlin, Mecklenburg- Vorpommern, Sachsen-Anhalt	757
1.3.35	Tertiär, Unterpaläozän – Niedersachsen	769
1.3.36	Tertiär, Unterpaläozän – Schleswig-Holstein	783
1.3.37	Tertiär, Landau-Fm. und Bodenheimer-Fm. – Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz	794
1.3.38	Tertiär, Untere Meeresmolasse – Bayern	815
1.4	Kristallines Wirtsgestein	831
1.4.1	Baden-Württemberg (BW)	831
1.4.2	Bayern (BY)	839
1.4.3	Hessen (HE)	853

1.4.4	Nordrhein-Westfalen (NW)	861
1.4.5	Prä-Perm-Horizont des Southern Permian Basin Atlas (SBPA)	870
1.4.6	Rheinland-Pfalz (RP)	881
1.4.7	Sachsen (SN)	889
1.4.8	Thüringen (TH)	903
2	Modellierprotokoll zur Erstellung der Quartärbasis	912
2.1	Einleitung und Zielsetzung	912
2.2	Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden	913
2.2.1	Modellierung der Quartärbasis	916
2.2.1.1	Vorgehensweise bei der Bearbeitung	916
2.2.2	Anmerkungen zur Bearbeitung	919
2.2.3	Ergebnis	920
2.2.4	Entscheidungserhebliche Tatsachen	921
3	Literaturverzeichnis	922
	Anzahl der Blätter dieses Dokumentes	950

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)	32
Abbildung 2:	Überblick über die Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, auf Basis der Salzstrukturen in Brandenburg.	38
Abbildung 3:	Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)	43
Abbildung 4:	Ausschnitt der Datengrundlage für die Modellierung der Salzstrukturen im Süden von Mecklenburg-Vorpommern.	45
Abbildung 5:	Überblick über die modellierten Salzstrukturen in Mecklenburg-Vorpommern und angrenzenden Bundesländern.	47
Abbildung 6:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen.	51
Abbildung 7:	Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)	55
Abbildung 8:	Überblick über den nordwestlichen Teil des Modelliererergebnis.	64
Abbildung 9:	Überblick über den nordöstlichen Teil des Modelliererergebnis.	65
Abbildung 10:	Überblick über den südlichen Teil des Modelliererergebnis.	66
Abbildung 11:	Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)	74
Abbildung 12:	Ausschnitt der Datengrundlage für die Modellierung der Salzstrukturen im Norden von Sachsen-Anhalt.	76
Abbildung 13:	Überblick über die modellierten Salzstrukturen in Sachsen-Anhalt und angrenzenden Bundesländern.	79
Abbildung 14:	Überblick über die Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen auf Basis der Salzstrukturen in Sachsen-Anhalt.	84
Abbildung 15:	Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)	89
Abbildung 16:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen.	95
Abbildung 17:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Brandenburg und Berlin	105
Abbildung 18:	Tiefengeologisches Profil durch die Norddeutsche Senke, Anteil Brandenburg (Stackebrandt & Lippstreu 2010)	106
Abbildung 19:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Hessen	118
Abbildung 20:	Profilschnitt durch das Werra-Becken bis ins Solling-Becken im nördlichen Hessen im Übergang zu Niedersachsen (DokID11841779)	119

Abbildung 21:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Mecklenburg-Vorpommern	131
Abbildung 22:	Profilschnitt durch das Tafeldeckgebirge durch Mecklenburg-Vorpommern.	132
Abbildung 23:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Niedersachsen, Bremen und Hamburg	145
Abbildung 24:	Profilschnitt im Bereich der Elm-Scholle und der Lappwald-Helmstedt-Scholle	147
Abbildung 25:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Nordrhein-Westfalen	159
Abbildung 26:	Profilschnitt durch das Niederrhein-Becken (Reinhold et al. 2014)	160
Abbildung 27:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Sachsen-Anhalt	175
Abbildung 28:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Schleswig-Holstein	187
Abbildung 29:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Zechstein in Thüringen und Bayern	202
Abbildung 30:	Profilschnitt aus der GK25, Blatt 4631 Sondershausen, am Nordrand des Thüringer Beckens	204
Abbildung 31:	Profilschnitt aus der GK25, Blatt 5226 Stadtlengsfeld, im Werra-Becken	205
Abbildung 32:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Oberen Buntsandstein (Röt) in Mecklenburg-Vorpommern	216
Abbildung 33:	Ausschnitt aus dem SW-NE-Profilschnitt durch Mecklenburg-Vorpommern (Franke et al. 2015b)	217
Abbildung 34:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Oberen Buntsandstein (Röt) in Niedersachsen, Bremen und Hamburg	229
Abbildung 35:	Geologischer Profilschnitt der südwestlichen Region des Norddeutschen Beckens, basierend auf seismischen Daten (Mazur et al. 2005)	230
Abbildung 36:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Oberen Buntsandstein in Schleswig-Holstein	242
Abbildung 37:	Ausschnitt aus dem SW-NE-Profilschnitt durch Schleswig-Holstein (Walter 2007)	243

Abbildung 38:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Mittleren Muschelkalk in Baden-Württemberg	255
Abbildung 39:	Ausschnitt aus dem NW-SO-Profileschnitt durch Baden-Württemberg (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 1999)	255
Abbildung 40:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Mittleren Muschelkalk in Mecklenburg-Vorpommern	264
Abbildung 41:	Ausschnitt aus dem SW-NE-Profileschnitt durch Mecklenburg-Vorpommern (Franke et al. 2015a)	264
Abbildung 42:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Mittleren Muschelkalk in Niedersachsen, Bremen und Hamburg	279
Abbildung 43:	Geologischer Profilschnitt der südwestlichen Region des Norddeutschen Beckens, basierend auf seismischen Daten (Mazur et al. 2005)	280
Abbildung 44:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Mittleren Muschelkalk in Schleswig-Holstein	292
Abbildung 45:	Ausschnitt aus dem SW-NE-Profileschnitt durch Schleswig-Holstein (Walter 2007)	292
Abbildung 46:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für den Mittleren Keuper in Niedersachsen, Bremen und Hamburg	310
Abbildung 47:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung des Mittleren Keuper in Sachsen-Anhalt	319
Abbildung 48:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für den Mittleren Keuper in Schleswig-Holstein	329
Abbildung 49:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Malm in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen	341
Abbildung 50:	Profilschnitt im Bereich Alfhausen-Damme. Die Malmsalinare gehören zum Oberjura (jo) (Reinhold et al. 2014)	342
Abbildung 51:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Tertiär in Baden-Württemberg	351
Abbildung 52:	Ausschnitt aus dem Profilschnitt durch den Oberrheingraben im Bereich Kleinfankenheim bis Renchen (GeORG-Projektteam 2013b)	352
Abbildung 53:	Standardprofil Forschungsbohrung Dannenfels 1 und Bohrung Landstuhl 1. Maßstabsbalken zeigen die Tiefe (MD) in Meter.	370

Abbildung 54:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Lias in Brandenburg und Berlin	422
Abbildung 55:	Profilschnitt von der Struktur Burg Stargard bis Struktur Friesack mit Lage der Bohrungen (Feldrappe 2003).	422
Abbildung 56:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Lias in Niedersachsen, Hamburg und Bremen	436
Abbildung 57:	Profilschnitt von der Wunstorf-Synkline zur Calberlah-Scholle (Feldrappe 2006)	436
Abbildung 58:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein Lias in Nordrhein Westfalen.	452
Abbildung 59:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für die Tongesteinsformationen des Lias in Mecklenburg-Vorpommern	462
Abbildung 60:	Geologischer Schnitt in Südwest-Mecklenburg, durch verschiedene Zechstein-Salzstrukturen (z) und das Deckgebirge, welches die Abfolgen des Jura (j) beinhaltet (Müller & Obst 2008)	463
Abbildung 61:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Lias in Sachsen-Anhalt	482
Abbildung 62:	Geologischer Profilschnitt durch Sachsen-Anhalt (Colditz et al. 2019) vom Harz im Süden über die Magdeburger Börde und Colbitz-Letzlinger Heide bis zur Altmark im Norden.	482
Abbildung 63:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen	495
Abbildung 64:	Geologischer Profilschnitt durch Schleswig-Holstein (Thomsen et al. 2017; basierend auf Baldschuhn et al. 2001)	496
Abbildung 65:	West-Ost-Schnitt durch Schleswig-Holstein vom Westschleswig-Block über den (nördlichen) Glückstadt-Graben zum Ostholstein-Block (Baldschuhn et al. 2001)	497
Abbildung 66:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Dogger in Brandenburg und Berlin.	510
Abbildung 67:	Profilschnitt von der Struktur Burg Stargard bis Struktur Friesack mit Lage der Bohrungen (Feldrappe 2003).	510
Abbildung 68:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Dogger in Niedersachsen, Hamburg und Bremen.	524
Abbildung 69:	Profilschnitt von der Wunstorf-Synkline zur Caberlah-Scholle (Feldrappe 2006)	525
Abbildung 70:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Mittleren Jura in Nordrhein-Westfalen.	539

Abbildung 71:	Ausschnitt aus dem Profilschnitt von der Münsterländer Scholle über die Nordwestfalen-Lippe-Scholle bis zur Recke-Mulde im NNE aus dem Geotektonischen Atlas, Profil 98 (Baldschuhn et al. 2001).	539
Abbildung 72:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Mittleren Jura in Mecklenburg-Vorpommern.	549
Abbildung 73:	Profilschnitt von der Struktur Prerow zur Struktur Marnitz (Feldrappe 2003).	550
Abbildung 74:	Profilschnitt von der Struktur Marnitz zur Struktur Roxförde (Feldrappe 2003).	550
Abbildung 75:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Mittleren Jura in Sachsen-Anhalt.	564
Abbildung 76:	Profilschnitt von der Struktur Marnitz bis Roxförde mit Lage der Bohrungen (Feldrappe 2003).	565
Abbildung 77:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen	577
Abbildung 78:	Profilschnitt durch die Schwäbische Alb und das Molassebecken (Hoth et al. 2007)	578
Abbildung 79:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen	590
Abbildung 80:	Fazies- und Mächtigteitsentwicklung des Braunjura zwischen Wutach und Ries (Geyer et al. 2011)	591
Abbildung 81:	Fazies- und Mächtigteitsentwicklung des Mittleren Jura im Gebiet des Oberrheingrabens.	592
Abbildung 82:	Verbreitung des Malm in Baden-Württemberg mit Mächtigteitsisolinie (nach Rupf & Nitsch 2008) und Ausschlussbereich des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“	596
Abbildung 83:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Brandenburg.	611
Abbildung 84:	Geologisch-tektonischer Schnitt vom Harzvariszikum über Brandenburg bis zur Offshore-Bohrung G 14/1 in der südlichen Ostsee (Franke et al. 2015a)	612
Abbildung 85:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Niedersachsen.	632
Abbildung 86:	Geologischer Profilschnitt Niedersachsen (Baldschuhn et al. 2001)	632
Abbildung 87:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Nordrhein-Westfalen.	652
Abbildung 88:	Vereinfachtes geologisches Profil durch die Münsterländer Kreidebucht (Geothermiezentrum Bochum 2019, bereitgestellt durch GD NRW 2019)	652

Abbildung 89:	Vereinfachtes geologisches Profil durch das Norddeutsche Bergland/Wiehengebirgsvorland, modifiziert nach Schäfer (2016)	653
Abbildung 90:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen	668
Abbildung 91:	Geologischer Schnitt durch verschiedene Zechstein-Salzstrukturen (z) in Südwest-Mecklenburg (Müller & Obst 2008)	668
Abbildung 92:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen	687
Abbildung 93:	Geologisch-tektonischer Schnitt vom Harzvariszikum über Brandenburg bis zur Offshore-Bohrung G 14/1 in der südlichen Ostsee (Franke et al. 2015b)	687
Abbildung 94:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen	702
Abbildung 95:	Geologischer Profilschnitt durch Schleswig-Holstein (Thomsen et al. (2017), basierend auf dem 3D-Modell SH – LLUR SH 2016 von Baldschuhn et al. (2001)	703
Abbildung 96:	W-E Schnitt durch Schleswig-Holstein vom Westschleswig-Block über den (nördlichen) Glückstadt-Graben zum Ostholstein-Block (Baldschuhn et al. 2001)	704
Abbildung 97:	Überblick über das Modellierungsergebnis. Die Landesgrenze Bayerns ist in schwarz abgebildet.	714
Abbildung 98:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Brandenburg und Sachsen.	728
Abbildung 99:	Profilschnitt durch Brandenburg von Prignitz bis in die Niederlausitz. Aus (Stackebrandt 2010).	728
Abbildung 100:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Nordrhein-Westfalen und dem angrenzenden Gebiet in Niedersachsen.	750
Abbildung 101:	Profilschnitt Nr. 113 des Geotektonischen Atlas 3D (Baldschuhn 2001) durch einen Teil des nördlichen Münsterländer Kreidebeckens und dessen Begrenzung durch das Osning-Lineament	750
Abbildung 102:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Schichtenpaket Thanetium/Ypresium (unteres Paläogen)	766
Abbildung 103:	Profilschnitt durch Brandenburg, exemplarisch für die Lage des Tertiär im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens (verändert nach Stackebrandt 2010)	767
Abbildung 104:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Schichtenpaket Thanetium/Ypresium (unteres Paläogen)	781
Abbildung 105:	Profilschnitt von Kleinhain bis Harsefeld im Elbe-Weser-Dreieck (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016).	781

Abbildung 106:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen	792
Abbildung 107:	Exemplarischer Profilschnitt (Baldschuh et al. 2001) für die Ablagerung des Tertiär in Salinarrandsenken bei fehlender Bedeckung auf dem Top der Salinarstruktur in Schleswig-Holstein	793
Abbildung 108:	Stratigraphische Übersicht zur Formationsgliederung des Tertiär im Oberrheingraben (modifiziert nach Geyer & Gwinner 2011)	796
Abbildung 109:	Detaillierte Stratigraphie der Stockstadt-Gruppe im mittleren und nördlichen ORG und Korrelation mit den Formationen des Mainzer Beckens (Schäfer 2012)	797
Abbildung 110:	Lithostratigraphische Einstufung der tertiären Gesteinsabfolgen im Oberrheingraben (Grimm et al. 2011)	798
Abbildung 111:	Standardprofil aus dem nördlichen Oberrheingraben mit repräsentativen SP- und Widerstandsmessungen.	807
Abbildung 112:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen der Bodenheim-Formation	811
Abbildung 113:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen der Landau-Formation	812
Abbildung 114:	Profilschnitt durch den Oberrheingraben (Geyer et al. 2011)	812
Abbildung 115:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen, ältere Untere Meeresmolasse.	827
Abbildung 116:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen, jüngere Untere Meeresmolasse	827
Abbildung 117:	Profilschnitt durch das Molassebecken und Übersichtskarte.	828
Abbildung 118:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Baden-Württemberg anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD	838
Abbildung 119:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Bayern anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD	852
Abbildung 120:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Hessen anhand des 3D-Modells in SKUA-GOCAD	860
Abbildung 121:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Nordrhein-Westfalen anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD	869
Abbildung 122:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Norddeutschland anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD	880

Abbildung 123:	Schematischer geologischer Schnitt durch den Pfälzer Wald und Oberrheingraben (GÜK200 - CC 7110 Mannheim); Schnittlage Ost-West mit Knickpunkten an den Bohrungen Landau 207 und Rülzheim 2; Kristalline Gesteine der MKZ (in Rosa dargestellt) unter Überdeckung (kleiner 1000 m) von Rotliegend- und Buntsandstein-Einheiten im Pfälzer Wald; gut zu erkennen sind Südsüdwest-Nordnordost streichenden Abschiebungen im Osten, die bei der Anlage des Oberrheingrabens entstanden sind.	881
Abbildung 124	Schematischer geologischer Schnitt durch das Saar-Nahe-Becken (GÜK200 – CC 7102 Saarbrücken); Schnittlage Nordwest-Südost.	882
Abbildung 125:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Rheinland-Pfalz anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD	888
Abbildung 126:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Sachsen anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD	902
Abbildung 127:	Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Thüringen anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD	910
Abbildung 128:	Überblick über das Ergebnis der Modellierung der Quartärbasis in Nord- und Teilen Mitteldeutschlands	920
Abbildung 129:	Überblick über das Ergebnis der Modellierung der Quartärbasis in Süd- und Teilen Mitteldeutschlands	921

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auflistung aller verwendeten Daten	33
Tabelle 2:	Liste der Salzstrukturen, deren Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) sowie der Strukturtyp aus dem InSpEE-Bericht (von Goerne et al. 2016)	34
Tabelle 3:	Vorgehensweise zur Anwendung der Mindestanforderungen	34
Tabelle 4:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage u. GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzscheibe)	39
Tabelle 5:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	40
Tabelle 6:	Auflistung aller verwendeten Daten	44
Tabelle 7:	Auflistung der Salzstrukturen und deren Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) sowie der Strukturtyp aus dem InSpEE-Bericht (von Goerne et al. 2016)	45
Tabelle 8:	Vorgehensweise zur Anwendung der Mindestanforderungen	47
Tabelle 9:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage u. GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzscheibe)	51
Tabelle 10:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	52
Tabelle 11:	Auflistung aller verwendeten Daten	56
Tabelle 12:	Liste der Salzstrukturen in Niedersachsen, die auf Basis der InSpEE-Niveauschnitte modelliert wurden, deren Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) sowie der Strukturtyp aus dem InSpEE-Bericht (Anhang 3-1)	57
Tabelle 13:	Vorgehensweise der Anwendung der Mindestanforderungen	59
Tabelle 14:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzscheibe)	66
Tabelle 15:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	71
Tabelle 16:	Auflistung aller verwendeten Daten	75
Tabelle 17:	Aufliste der Salzstrukturen, deren Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) sowie der Strukturtyp aus dem InSpEE-Bericht (von Goerne et al. 2016)	76
Tabelle 18:	Vorgehensweise der Anwendung der Mindestanforderungen	79
Tabelle 19:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzscheibe)	85

Tabelle 20:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	86
Tabelle 21:	Auflistung aller verwendeten Daten	90
Tabelle 22:	Vorgehensweise der Anwendung der Mindestanforderungen.	91
Tabelle 23:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage u. GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzscheibe)	95
Tabelle 24:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	96
Tabelle 25:	Auflistung aller verwendeten Daten	99
Tabelle 26:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird	99
Tabelle 27:	Auflistung aller Gebiete in Brandenburg und Berlin, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	107
Tabelle 28:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	107
Tabelle 29:	Auflistung aller verwendeten Daten	111
Tabelle 30:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	112
Tabelle 31:	Auflistung aller Gebiete in Hessen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	119
Tabelle 32:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	120
Tabelle 33:	Auflistung aller verwendeten Daten	123
Tabelle 34:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	125
Tabelle 35:	Auflistung aller Gebiete in Mecklenburg-Vorpommern, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	132
Tabelle 36:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	133
Tabelle 37:	Auflistung aller verwendeten Daten	136
Tabelle 38:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	137
Tabelle 39:	Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	148
Tabelle 40:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	149
Tabelle 41:	Auflistung aller verwendeten Daten	151

Tabelle 42:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	152
Tabelle 43:	Auflistung aller Gebiete in Nordrhein-Westfalen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	160
Tabelle 44:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	163
Tabelle 45:	Auflistung aller verwendeten Daten	166
Tabelle 46:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	168
Tabelle 47:	Auflistung aller Gebiete in Sachsen-Anhalt, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	175
Tabelle 48:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	176
Tabelle 49:	Auflistung aller verwendeten Daten	180
Tabelle 50:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	181
Tabelle 51:	Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	187
Tabelle 52:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	188
Tabelle 53:	Auflistung aller verwendeten Daten	191
Tabelle 54:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen in Thüringen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	193
Tabelle 55:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen in Bayern, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	195
Tabelle 56:	Auflistung aller Gebiete in Thüringen und Bayern, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	206
Tabelle 57:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	206
Tabelle 58:	Auflistung aller verwendeten Daten	210
Tabelle 59:	Vorgehensweise der Bearbeitung zur Anwendung der Mindestanforderungen	211
Tabelle 60:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	217
Tabelle 61:	Auflistung aller verwendeten Daten	219
Tabelle 62:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	221

Tabelle 63:	Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, Bremen und Hamburg, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	230
Tabelle 64:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten	231
Tabelle 65:	Auflistung aller verwendeten Daten	234
Tabelle 66:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird	236
Tabelle 67:	Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	243
Tabelle 68:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	244
Tabelle 69:	Auflistung aller verwendeten Daten	246
Tabelle 70:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	247
Tabelle 71:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	256
Tabelle 72:	Auflistung aller verwendeten Daten	258
Tabelle 73:	Vorgehensweise der Bearbeitung zur Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird	260
Tabelle 74:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	265
Tabelle 75:	Auflistung aller verwendeten Daten	268
Tabelle 76:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	269
Tabelle 77:	Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, Bremen und Hamburg, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	280
Tabelle 78:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	281
Tabelle 79:	Auflistung aller verwendeten Daten	283
Tabelle 80:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	285
Tabelle 81:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	293
Tabelle 82:	Auflistung aller verwendeten Daten	296
Tabelle 83:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	297

Tabelle 84:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	299
Tabelle 85:	Auflistung aller verwendeten Daten	303
Tabelle 86:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	303
Tabelle 87:	Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, Hamburg und Bremen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	311
Tabelle 88:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	311
Tabelle 89:	Auflistung aller verwendeten Daten	315
Tabelle 90:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	316
Tabelle 91:	Auflistung aller Gebiete in Sachsen-Anhalt, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	319
Tabelle 92:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	320
Tabelle 93:	Auflistung aller verwendeten Daten	322
Tabelle 94:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	324
Tabelle 95:	Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	330
Tabelle 96:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	330
Tabelle 97:	Auflistung aller verwendeten Daten	333
Tabelle 98:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird	334
Tabelle 99:	Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	342
Tabelle 100:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	342
Tabelle 101:	Auflistung aller verwendeten Daten	345
Tabelle 102:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	346
Tabelle 103:	Auflistung aller Gebiete in Baden-Württemberg, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche	352
Tabelle 104:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	353

Tabelle 105:	Auflistung aller verwendeten Daten	356
Tabelle 106:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	357
Tabelle 107:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank.	363
Tabelle 108:	Auflistung aller verwendeten Daten	367
Tabelle 109:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	372
Tabelle 110:	Auflistung aller verwendeten Daten	374
Tabelle 111:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	378
Tabelle 112:	Auflistung aller verwendeten Daten	381
Tabelle 113:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird	381
Tabelle 114:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	386
Tabelle 115:	Auflistung aller verwendeten Daten	389
Tabelle 116:	Vorgehensweise zur Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	390
Tabelle 117:	Übersicht über die entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	395
Tabelle 118:	Auflistung aller verwendeten Daten	397
Tabelle 119:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	398
Tabelle 120:	Übersicht über die entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	403
Tabelle 121:	Auflistung aller verwendeten Daten	406
Tabelle 122:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	407
Tabelle 123:	Übersicht über die entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	410
Tabelle 124:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	413
Tabelle 125:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.	415
Tabelle 126:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen	423
Tabelle 127:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	423

Tabelle 128:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	428
Tabelle 129:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	429
Tabelle 130:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km ² , befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.	437
Tabelle 131:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten . und deren ID in der BGE-internen Datenbank	439
Tabelle 132:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	443
Tabelle 133:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	446
Tabelle 134:	Auflistung alle Mindestanforderungen erfüllender Gebiete	452
Tabelle 135:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	453
Tabelle 136:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	457
Tabelle 137:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	458
Tabelle 138:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km ² , befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.	463
Tabelle 139:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	464
Tabelle 140:	Auflistung aller verwendeten Daten.	468
Tabelle 141:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten.	473
Tabelle 142:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.	475
Tabelle 143:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Flächengrößen	482
Tabelle 144:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	483
Tabelle 145:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten.	487
Tabelle 146:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	489

Tabelle 147:	Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, die die Mindestanforderungen erfüllen mit Angabe der Fläche	497
Tabelle 148:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank.	498
Tabelle 149:	Auflistung aller verwendeten Daten.	501
Tabelle 150:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	503
Tabelle 151:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km ² , befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der Identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.	511
Tabelle 152:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	511
Tabelle 153:	Auflistung aller verwendeten Daten	516
Tabelle 154:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	517
Tabelle 155:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km ² befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.	525
Tabelle 156:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	527
Tabelle 157:	Auflistung aller verwendeten Daten	530
Tabelle 158:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	532
Tabelle 159:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km ² befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.	540
Tabelle 160:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	540
Tabelle 161:	Auflistung aller verwendeten Daten	543
Tabelle 162:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	545
Tabelle 163:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche)	551

Tabelle 164:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	551
Tabelle 165:	Auflistung allerverwendeten Daten	556
Tabelle 166:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	557
Tabelle 167:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche).	565
Tabelle 168:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	566
Tabelle 169:	Auflistung aller verwendeten Daten	569
Tabelle 170:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	570
Tabelle 171:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, sowie deren Fläche	578
Tabelle 172:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	579
Tabelle 173:	Auflistung aller verwendeten Daten	582
Tabelle 174:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	583
Tabelle 175:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, sowie deren Fläche	592
Tabelle 176:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	593
Tabelle 177:	Auflistung aller verwendeten Daten	595
Tabelle 178:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	597
Tabelle 179:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten.	601
Tabelle 180:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	603
Tabelle 181:	Übersicht über Bohrungen der Tonstudie der Tonanteilkategorie 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) in den Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen.	610
Tabelle 182:	Auflistung aller Gebiete in Brandenburg, die aus der Auswertung der Daten resultieren, mit Angabe der Flächengrößen	612
Tabelle 183:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	613
Tabelle 184:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	617

Tabelle 185:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.	621
Tabelle 186:	Übersicht über stichprobenhaft ausgewählte Bohrungen der Tonstudie der Tonanteilklassen 1a und 1b (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) in Niedersachsen	630
Tabelle 187:	Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, die aus der Auswertung der Daten resultieren mit Angabe der Flächengrößen. Flächen, die kleiner sind als 10 km ² , befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.	632
Tabelle 188:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	635
Tabelle 189:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten.	639
Tabelle 190:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	643
Tabelle 191:	Auflistung aller Gebiete in Nordrhein-Westfalen, die aus der Auswertung der Daten resultieren mit Angabe der Flächengrößen. Flächen, die kleiner sind als 10 km ² , befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.	654
Tabelle 192:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	654
Tabelle 193:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	658
Tabelle 194:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	660
Tabelle 195:	Übersicht über Bohrungen der Tonstudie der Tonanteilkategorie 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) in den Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen	666
Tabelle 196:	Auflistung aller Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, der Unterkreide in Mecklenburg-Vorpommern mit Flächenangaben	668
Tabelle 197:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	669
Tabelle 198:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten.	674
Tabelle 199:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.	678
Tabelle 200:	Übersicht über Bohrungen der Tonstudie der Tonanteilkategorie 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) in den Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen	685

Tabelle 201:	Auflistung aller Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, der Unterkreide in Sachsen-Anhalt mit Flächenangaben	688
Tabelle 202:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	688
Tabelle 203:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	692
Tabelle 204:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.	693
Tabelle 205:	Übersicht über Bohrungen der Tonstudie der Tonanteilkategorie 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) in den Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen	700
Tabelle 206:	Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, die aus der Auswertung der Daten resultieren mit Angabe der Flächengröße. Flächen, die kleiner sind als 10 km ² , befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.	704
Tabelle 207:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	705
Tabelle 208:	Auflistung aller verwendeten Daten	709
Tabelle 209:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	710
Tabelle 210:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	717
Tabelle 211:	Auflistung aller verwendeten Daten	720
Tabelle 212:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen.	721
Tabelle 213:	Auflistung aller Gebiete in Brandenburg und Sachsen, die die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Flächengrößen.	727
Tabelle 214:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	729
Tabelle 215:	Auflistung aller verwendeten Daten	732
Tabelle 216:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	734
Tabelle 217:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	739
Tabelle 218:	Auflistung aller verwendeten Daten	743
Tabelle 219:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	744

Tabelle 220:	Auflistung aller Gebiete in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen, die die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Flächengrößen	749
Tabelle 221:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	751
Tabelle 222:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	760
Tabelle 223:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	762
Tabelle 224:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen	768
Tabelle 225:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	768
Tabelle 226:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	772
Tabelle 227:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	774
Tabelle 228:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen, Fläche)	781
Tabelle 229:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	782
Tabelle 230:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten.	785
Tabelle 231:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	786
Tabelle 232:	Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen, Fläche)	793
Tabelle 233:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	793
Tabelle 234:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	800
Tabelle 235:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird	801
Tabelle 236:	Auflistung aller Gebiete welche nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungen mit Einfallen“ die Mindestanforderungen erfüllen	812
Tabelle 237:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	814
Tabelle 238:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	818
Tabelle 239:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschreiben wird	820
Tabelle 240:	Auflistung aller Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, mit ihrer Fläche	829

Tabelle 241:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank	830
Tabelle 242:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	832
Tabelle 243:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen.	833
Tabelle 244:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten	838
Tabelle 245:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	841
Tabelle 246:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen	842
Tabelle 247:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten	852
Tabelle 248:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	854
Tabelle 249:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen	854
Tabelle 250:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten	860
Tabelle 251:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	862
Tabelle 252:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen	863
Tabelle 253:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten	869
Tabelle 254:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	874
Tabelle 255:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen	874
Tabelle 256:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten	880
Tabelle 257:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	882
Tabelle 258:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen	883
Tabelle 259:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten	888
Tabelle 260:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	892
Tabelle 261:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen	893
Tabelle 262:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten	902
Tabelle 263:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	904
Tabelle 264:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen	905
Tabelle 265:	Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten	910
Tabelle 266:	Auflistung der verwendeten Eingangsdaten für Nord- und Teile Mitteldeutschlands	913
Tabelle 267:	Auflistung der verwendeten Eingangsdaten für Süd- und Teile Mitteldeutschlands	914
Tabelle 268:	Vorgehensweise zur Erstellung der Quartärbasisfläche für Nord- und Teile Mitteldeutschlands	916

Tabelle 269: Vorgehensweise zur Erstellung der Quartärbasisfläche für Süd- und
Teile Mitteldeutschlands

917

Abkürzungsverzeichnis

2D, 3D	zweidimensional, dreidimensional
ABVO	Allgemeine Bergverordnung
AK	Ausschlusskriterien
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AnSichT	Projekt „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“
ArcGIS	Oberbegriff für verschiedene Geoinformationssystem-Softwareprodukte des Unternehmens ESRI (Environmental Systems Research Institute)
ArcMap	In der Desktop Anwendungssuite ArcGIS Desktop sind die Anwendungen ArcGIS Pro und ArcMap enthalten
ASCII	„American Standard Code for Information Interchange“, 7-Bit-Zeichenkodierung, die der US-Variante von ISO 646 entspricht
AtG	Atomgesetz
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BB	Bundesland Brandenburg
BE	Bundesland Berlin
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover), Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, zentrale geowissenschaftliche Beratungseinrichtung der Bundesregierung
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BUE	Behörde für Umwelt und Energie
BY	Bundesland Bayern
BW	Bundesland Baden-Württemberg
CSV	„Comma Separated Values“, Speicherformat für Datensätze
DB	Datenbank
DGM	Digitales Geländemodell
DokID	Dokument-Identifikator
DSK	Deutsche Stratigraphische Kommission

DXF	„Drawing Interchange File Format“, von Autodesk spezifiziertes Dateiformat zum CAD-Datenaustausch, das in das CAD-Programm AutoCAD integriert wurde
EL	Einlagerungsbereich
ELO	Elektronischer Leitz-Ordner
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
GDNRW	Geologischer Dienst NRW
geoWK	geowissenschaftliche Abwägungskriterien
GIS	Geoinformationssystem
GOK	Geländeoberkante
GÜK	Geologische Übersichtskarte
GÜK200	Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 200 000
HB	Bundesland Bremen
HH	Bundesland Hamburg
HE	Bundesland Hessen
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
ID	Identifikator
IG	identifiziertes Gebiet
InSpEE	Projekt „Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzungen für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)“
IUGS	International Union of Geological Sciences
k_f	Gebirgsdurchlässigkeit
LAGB	Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen
LBGR	Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LGB	Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
LGEB	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg

LLUR	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein
LUA	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland
LUNG	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
MA	Mindestanforderung(en)
MG	Mindestanforderungsgebiete; d. h. Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen
MKZ	Mitteldeutsche Kristallinzone
MO	Moldanubikum
MV	Bundesland Mecklenburg-Vorpommern
NDB	Norddeutsches Becken
NG	Gebiete, die aufgrund nicht hinreichender geologischer Daten nicht eingeordnet werden können
NI	Bundesland Niedersachsen
NiKo	Nicht-Konventionelle Kohlenwasserstoffvorkommen
NN	Normalnull
NPZ	Nördliche Phyllitzone
NW	Bundesland Nordrhein-Westfalen
QS	Qualitätssicherung
RHE	Renoherzynikum
RP	Bundesland Rheinland-Pfalz
SenUVK	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin
SGD	Staatliche Geologische Dienste
SH	Bundesland Schleswig-Holstein
SKUA-GOCAD™	3D-Geomodellier-Softwaresuite von Emerson™
SL	Bundesland Saarland
SN	Bundesland Sachsen
SO	Saxothuringikum
SPZ	Südliche Phyllitzone
SQL	Datenbanksprache zur Definition von Datenstrukturen in relationalen Datenbanken

ST	Bundesland Sachsen Anhalt
STA	Standortauswahl
StandAG	Standortauswahlgesetz
STD	Stratigraphische Tabelle von Deutschland
SV	Schichtenverzeichnis
TH	Bundesland Thüringen
TLUBN	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
TUNB	Tiefer Untergrund Norddeutsches Becken; Kurzbezeichnung für das Projekt „Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken“
TU	Technische Universität
u. GOK	unter Geländeoberkante
UBM	Untere Brackwassermolasse
UMM	Untere Meeresmolasse
USM	Untere Süßwassermolasse
VA	Verfahrensanweisung
VBA	Microsoft Visual Basic

Glossar

Ein berichtsübergreifendes Glossar ist der Unterlage „Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren“ (BGE 2020af) zu entnehmen.

1 Bundeslandspezifische Modellierprotokolle

1.1 Steinsalz in steiler Lagerung

1.1.1 Brandenburg und Berlin

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für Steinsalz in steiler Lagerung in der Einheit Zechstein, die aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Brandenburg und Berlin (BB-BE). Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 BGE 2020j) die salinaren Gesteinsabfolgen des Oberrotliegend und Zechstein in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Niveauschnitte) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Brandenburg und Berlin, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in BGE (2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Im Untergrund Norddeutschlands existieren über 400 Salzdiapire (Salzstöcke und Salzmauern), die innerhalb des Norddeutschen Beckens (NDB) liegen. Die Salzdiapire werden aus salinaren Ablagerungen des Zechstein sowie in einigen Bereichen zusätzlich von Salinargesteinen des Oberrotliegend aufgebaut (Pollok et al. 2016).

Das Ende der variszischen Gebirgsbildung, im späten Karbon, markiert weltweit eine geologische Zeitwende, so dass während des Perm (296–251 Millionen Jahren) nahezu alle kontinentalen Platten (u. a. Gondwana und Laurasia) im Superkontinent Pangäa vereint waren (Meschede 2018). Im Zuge der weiteren geologischen Entwicklung in Mitteleuropa fand im frühen Perm der Übergang von einem kompressiven zu einem extensiven tektonischen Regime statt. Als Resultat der Krustendehnung und der darauffolgenden thermischen Beckensubsidenz im mittleren Perm bildeten sich innerhalb des Superkontinents Pangäa typische intrakontinentale Beckensysteme, wie z. B. das Zentraleuropäische Becken (Meschede 2018). Das Norddeutsche Becken gehört als Teil des südlichen Permbeckens dem intrakontinentalen Zentraleuropäischen Beckensystem an (Maystrenko et al. 2008).

Durch eine rasche marine Flutung des intrakontinentalen Rotliegend-Beckens entwickelte sich das oberpermische marin geprägte Zechsteinbecken. Je nach Beckenposition entstanden durch zyklische Eindunstung von Meerwasser bis zu sieben Zechstein-Salinarformationen im Zentrum und vier bis fünf an den Beckenrändern des NDB (Käding 2005a; Käding 2005b). Ein vollständiger mariner Salinarzyklus beginnt idealerweise mit tonigen Sedimenten, mit darauffolgenden karbonatischen (Kalkstein), sulfatischen (Gips und Anhydrit) und abschließend chloridischen Ablagerungen (Stein- und Kalisalze), die entsprechend ihrer stoffspezifischen Wasserlöslichkeit ausfallen („Eindampfungsabfolge“ (z. B. Warren 2015)). Die mächtigsten Steinsalzablagerungen finden sich in dem sogenannten Staßfurt-Steinsalz (z2-Hauptsalz) im Staßfurt-Zyklus (z2), aus dem auch der Hauptanteil des Salzes in den Zechsteinsalzstöcken stammt (Frisch & Kockel 2004). Ursprüngliche Mächtigkeiten des gesamten Zechstein werden mit bis zu 1500 m im zentralen Beckenbereich rekonstruiert (Baldschuhn et al. 2001; Scheck-Wenderoth et al. 2008). Die Zechstein-Mächtigkeit durch Salzakkumulation innerhalb von Salzdiapiren liegt in Norddeutschland bei ca. 4500 m (Baldschuhn et al. 2001). Die akkumulierte Mächtigkeit des Oberrotliegend- und Zechsteinsalinars innerhalb von Doppelsalinaren liegt bei über 7000 m (Baldschuhn et al. 2001).

Die Entwicklung von Salzstrukturen verläuft mehrphasig und beginnt mit stratiformen (flach lagernden) Salzschieben. Diese können zu plastischem Kriechen in Richtung der größten Druckentlastung angeregt werden und in ihrer Mächtigkeit zu sogenannten Salzkissen anschwellen. Die Genese der Salzstrukturen ist durch die Ausprägung der Randsenken ersichtlich, falls diese nicht erodiert wurden (Trusheim 1960). Bei fortschreitender Salzakkumulation ist das Deckgebirge durch Dehnung und Erosion beansprucht und der Salzzustrom kann entlang von Schwächezonen aufsteigen (Hudec & Jackson 2007). Das diapirisch durchgebrochene Salz intrudiert in die mesozoisch-känozoischen Sedimente und bildet Salzstöcke oder langgestreckte Salzmauern aus (Frisch & Kockel 2004). Für den weiteren Aufstieg des Salzdiapirs muss die Aufstiegs geschwindigkeit des Salzes größer als die Sedimentationsrate der Deckgebirgsschichten sowie die Ablagerungsrate im Dachbereich sein (Hudec & Jackson 2007). Das Ende der Phase des „aktiven Diapirismus“ wird zeitlich belegt durch das Vorhandensein von Deckgebirgsschichten, die den Salzdiapir vollständig und mit gleicher Mächtigkeit überdecken. Bei erneutem Salzzustrom („Nachschubstadium“) wird das Deckgebirge aufgewölbt, was mit der Bildung von Scheitelstörungen einhergehen kann (Frisch & Kockel 2004). Die diapirische Phase endet, wenn die mobilen Steinsalzvorkommen in den Kissenfüßen aufgebraucht sind. Durch Ablagerung der löslichen Bestandteile im Dachbereich von Salzstrukturen wird das Hutgestein aus den unlöslichen Rückständen gebildet.

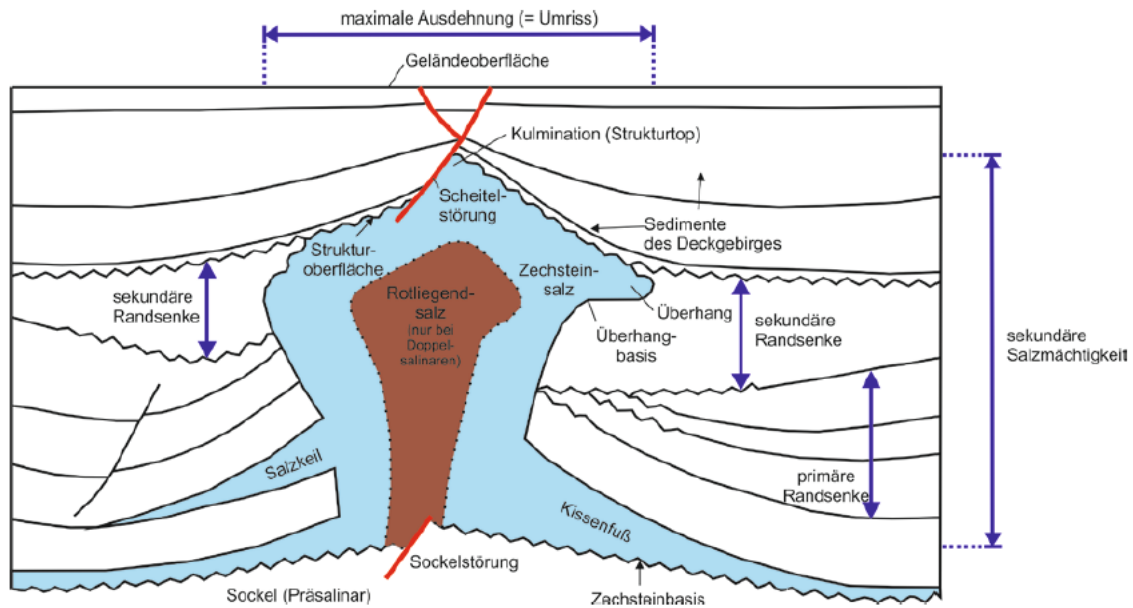


Abbildung 1: Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)

Das NDB ist charakterisiert durch einen tektonischen Stockwerksbau mit Bruchschollentektonik im subsalinaren Sockel und einem komplex strukturiertem Deckgebirge mit Salzstrukturen, die mechanisch durch das Zechstein-Salinar entkoppelt sind (Kockel 1999). Die Beckenentwicklung ist daher eng mit der Genese der Salzstrukturen verknüpft. Abhängig von der Beckenposition und dem regionaltektonischen Umfeld weisen die norddeutschen Salzstrukturen eine zeitlich und räumlich sehr variable Entwicklungsgeschichte auf (Kockel 1998). Sie unterscheiden sich zusätzlich durch ihre äußere Form und den Internbau. Die Hauptphasen der Diapirbildung erfolgten im Keuper und im Mitteljura bis zur Unterkreide (Scheck-Wenderoth et al. 2008). Während der Oberkreide änderte sich das Spannungsregime in eine Nordnordost-Südsüdwest gerichtete Einengung, die die Salzdiapirbildung vor allem in den herzynischen streichenden Sockelstörungen vorantrieb (Baldschuhn et al. 2001). Der mehrphasige Salzaufstieg und die unterschiedlichen lithologischen Zusammensetzungen führen zu einem komplexen Internbau mit intensiver Faltentektonik (de Boer 1971). Dennoch weisen die meisten Zechstein-Diapire eine Zweiteilung auf: einen Kern aus weitestgehend homogenem Steinsalz der Staßfurt-Formation und jüngere, weniger mobile Salinargesteine der jüngeren Zyklen, die durch höhere Anhydritanteile charakterisiert sind (Pollok et al. 2016).

Eingangsdaten

Alle Eingangsdaten(-sätze) sind in Tabelle 1 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 1: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname
1	BB	LBGR	11878605/7872	pl/ts	Brandenburg 3D (Schilling et al. 2018)
2	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM200
3	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)
4	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturumrisse_500m (von Goerne et al. 2016)
5	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturumrisse_1000m (von Goerne et al. 2016)
6	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturumrisse_1500m (von Goerne et al. 2016)
7	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturumrisse_2000m (von Goerne et al. 2016)
8	DE	BGR		pdf	InSpEE-Bericht, Anhang 3-1, 3-2 (von Goerne et al. 2016)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Das Modellgebiet von „Brandenburg 3D“ umfasst Brandenburg inklusive Berlin und erstreckt sich zu kleinen Teilen auch über das Gebiet der benachbarten Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Sachsen (Schilling et al. 2018). Einige der Salzstrukturen des geologischen 3D-Modells liegen auf der brandenburgischen Landesgrenze und teilweise gänzlich in Sachsen-Anhalt sowie Mecklenburg-Vorpommern. Die Salzstrukturen wurden mit der Landesgrenze verschnitten und alle Strukturen außerhalb Brandenburgs und Berlins wurden gelöscht.

Da der Salzstock Rambow im Brandenburg 3D-Modell vor der Landesgrenze zu Niedersachsen endet, während die strukturelle Verbindung in Niedersachsen bis zur brandenburgischen Grenze verläuft, wurde diese Lücke auf Basis von InSpEE-Niveauschnitten geschlossen.

Der Strukturumrisse der Salzstrukturen Gorleben-Rambow, die im Rahmen des InSpEE-Projektes entstanden (Pollok et al. 2016; Gast & Riesenberger 2016; von Goerne et al. 2016), wurden in ArcGIS Pro markiert und die vier Niveaus (500 m u. NN, 1000 m u. NN, 1500 m u. NN und 2000 m u. NN) als Shape-Dateien exportiert. Über Import von *Cultural Data* wurden diese Niveauschnitte in SKUA-GOCAD importiert, die bei diesem Schritt als Kurven eingeladen wurden und in die entsprechende Tiefe verschoben. Aus der Liste aller untersuchten Salzstrukturen im Norddeutschen Becken des InSpEE-Projekts (von Goerne et al. 2016) wurde der Strukturtop (Kulminationspunkt) in m u. NN von Gorleben

und Rambow entnommen und als Punkt in SKUA-GOCAD die angegebene Tiefe verschoben (Tabelle 2).

Zwischen den Kurven in den Tiefen 500 m u. NN bis 2000 m u. NN wurden Flächen über *New_From Curves_Several Curves* erzeugt. Bei dieser komplexen Salzstruktur mussten einzelne Teile der Struktur separat modelliert werden und dafür die Niveauschnitte temporär getrennt werden. Für die Topfläche wurde eine Fläche innerhalb des höchsten Niveauschnitts erzeugt, *Constraints* auf die *Border* gesetzt, die keine Bewegung in allen Richtungen erlauben und die Kulminationspunkte als *Control Points* definiert. Des Weiteren wurde eine Kurve erzeugt, die mittig entlang der Struktur verläuft und auf eine Teufe zwischen höchstem Niveauschnitt und Kulminationspunkt geschoben wurde, um als weitere *Constraints* genutzt zu werden. Die Triangulation der Fläche wurde erst auf Gleichschenkligkeit der Vermaschung verbessert (*Beautify Triangles for Equilaterality*) und dann wurde die Fläche interpoliert (*Geometry_On Entire Surface*). Die fertigen Flächen wurden als Gorleben-Rambow_InSpEE.ts gespeichert.

Tabelle 2: *Liste der Salzstrukturen, deren Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) sowie der Strukturtyp aus dem InSpEE-Bericht (von Goerne et al. 2016)*

Anzahl der Salzstrukturen	Salzstruktur	Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) [m u. NN]	Strukturtyp
1	Gorleben	100	Salzstock
2	Rambow	100	Salzstock

Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen sind in Tabelle 3 beschrieben.

Tabelle 3: *Vorgehensweise zur Anwendung der Mindestanforderungen*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG25) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Umhüllungsflächen der Salzstrukturen kopieren und Kopie um 300 m absenken	09_X1_BGE, 09_X1_-300.ts
b) DGM 2x kopieren und Kopie um 300 m und 1500 m absenken	DGM_200_gesamt_-1500.ts, DGM_200_gesamt_-1500.ts
c) Neue Hüllflächen aus a) mit DGM_-300m auf Tiefenlage prüfen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Hüllflächen aus a) mit DGM_-1500 verschneiden	09_X1_BGE_0, 09_X1_BGE_-300.ts
e) Abgesenkte Hüllflächen aus d) mit ursprünglichen Umhüllungsflächen aus d) verschneiden und umgekehrt	09_X1_BGE_0_area_merged_cut.ts, 09_X1_BGE_-300_area_merged_cut.ts
f) Ursprüngliches Top und abgesenkte Flanken löschen sowie eine neue Fläche aus abgesenkten Salzstrukturtops und originalen Flanken generieren	BB_salzkoerper.ts
g) Distanz/Mächtigkeit zwischen Hüllfläche und DGM_-1500m berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	
h) Neue Kurve aus Grenze der Fläche aus g) erstellen, kopieren und auf DGM_-1500 versetzen	09_X1_BGE_contourline.pl
i) Mit der ursprünglichen Kurve und der versetzten Kurve eine neue Fläche erstellen	09_X1_BGE_wall.ts
j) Neue Fläche aus g) und i) erstellen und Attribut „Tiefenlage“ erzeugen	MG_d_z_BB_1.ts, MG_d_z_BB_2.ts usw.
3. Export aller Gebiete aus j) als DXF-Datei für Maximalausdehnung und txt-Datei im ASCII-Format mit den Attributen „Maechtigkeit“ und „Tiefenlage“	MG_d_z_BB_1.dxf, MG_d_z_BB_2.dwg usw.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selbst sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993).

Da in allen ausgewiesenen Gebieten die lithostratigraphischen Einheiten roNA (Oberrotliegend-Salinar), z2NA (Staßfurt-Steinsalz), z3NA (Leine-Steinsalz) und/oder z4NA (Aller-Steinsalz) verbreitet sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als erfüllt angesehen. Der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, gibt für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ eine günstige Bewertung an. Diese ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger (BGE 2020b).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für Steinsalz in steiler Lagerung in den verbleibenden Gebieten in Brandenburg und Berlin **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Salinars wurde im dreidimensionalen Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die gesamte Salzstruktur zusammen (inklusive des Hutgesteins). Einige Salzstrukturen besitzen einen flach zulaufenden Überhang, auf den das 100 m-Kriterium aus technischer Machbarkeit nicht angewendet werden konnte. Dies ist jedoch zu vernachlässigen, da für die weitere Betrachtung der Teilgebiete die zentralen Bereiche bevorzugt werden, da dort ein allseitiger Umschließungsgrad gegeben ist und davon ausgegangen wird, dass im Zentrum eher geringere Vorkommen von nicht wirtsgesteinsrelevanten Salinargesteinen anzutreffen sind (Pollok et al. 2016).

- Technische Umsetzung

Das DGM_200_gesamt_-1500 m fungierte als Untergrenze für die Berechnung der vertikalen Mächtigkeiten der Salzstrukturen, die bei 1500 m u. GOK abgeschnitten wurden, (*Compute_Vertical Thickness*) und erzeugt die Eigenschaft „*Maechtigkeit*“ in den Flächen der Salzstrukturen (Tabelle 3, 2g). Die Eigenschaft „*Maechtigkeit*“ der Salzstrukturen wurde für die Visualisierung ausgewählt und Konturlinien, die eine Mächtigkeit von 100 m anzeigen, eingeschaltet. Aus den 100-m-Konturlinien wurden Kurven erzeugt (*New Curve_From Contour Lines*, Tabelle 3, 2h). Es fiel auf, dass bei den vertikal-stehenden Flanken der Salzstrukturen die unteren 100 m zur Basisfläche als geringer 100 m angezeigt wurden, was als Artefakt angesehen werden muss. Folglich wurden sie nicht verschnitten. Flanken, die nach außen hin einfallen wurden mit der 100 m-Mächtigkeitskontur geschnitten und die gering mächtigeren Teile gelöscht (Tabelle 3, 2g). Eine Kopie der Kontourlinie wurde auf das DGM_grob_-1500 m projiziert (*Project_on surface*, Tabelle 3, 2h) und aus dieser und der ursprünglichen Kontourlinie eine neue vertikale Wand erstellt (Tabelle 3, 2i) und der verbleibenden Fläche zugefügt (Tabelle 3, 2j).

Zu vermerken ist hierbei, dass im Falle von Überhängen und weiteren Unterschreitungen der 100 m Mindestmächtigkeiten, die in Hüllflächen der Salzdiapire auftreten können, aus technischen Gründen keine weitere Bearbeitung dieser Gebiete erfolgte. Im nachfolgenden Prozess zur weiteren Einengung der Teilgebiete auf Standortregionen ist eine Distanz zu den Flanken der Salzstöcke einzuhalten, sodass diese ungenügend mächtigen Bereiche nicht weiter betrachtet werden.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Als maximale Suchteufe wurden 1500 m festgelegt (BGE

2020m). Als Salzschwebe wurden 300 m oberhalb des potentiellen ewG gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG berücksichtigt.

- Technische Umsetzung

Um die Erfüllung dieser Mindestanforderung zu gewährleisten wurden die in den Ausgangsmodellen vorhandenen Umhüllungsflächen der Salzstrukturen kopiert und um 300 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 3, 2a). Bei Salzstöcken, deren Wände nicht senkrecht stehen, wurde mit der abgesenkten Umhüllungsfläche ein Duplikat der Salzstruktur (aus dem Ausgangsmodell), die in unveränderte Tiefe blieb, geschnitten (Tabelle 3 2e). Anschließend wurden die ursprünglichen Tops und abgesenkten Flanken gelöscht sowie neue Flächen aus den abgesenkten Tops und den originalen Flanken generiert (Tabelle 3, 2f).

Die Fläche Gorleben-Rambow auf Basis von InSpEE wurde auf Höhe der Rambow-Fläche aus dem Brandenburg 3D-Modell geschnitten, 300 m in die Tiefe versetzt und die überschüssigen Teile gelöscht.

Das Digitale Geländemodell (DGM) für Brandenburg wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe verschoben (*Compute_On Object*: z.B. Z = Z-300; Tabelle 3, 2b). Das DGM-300 m schnitt folgerichtig nach Anwendung des Kriteriums der Salzschwebe (vgl. Kapitel 3.1 in der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) keine Salzstruktur und wurde daher nicht weiterbearbeitet (Tabelle 3, 2c). Das DGM_200_gesamt_-1500 m wurde zusammengefügt, und an eine Auflösung von einer Kantenlänge von etwa 200 m angepasst und die Fläche außerhalb des Bearbeitungsbereich abgeschnitten. Mit diesem DGM_200_gesamt_-1500 m wurden die verbleibenden Hüllflächen der Salzstrukturen verschnitten und alle Teile unterhalb von 1500 m u. GOK gelöscht (Tabelle 3, 2d).

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Steinsalz in steiler Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Automatisiert können Flächen mit geringerer Ausbreitung in der länderübergreifenden Bearbeitung gelöscht werden.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Brandenburg und Berlin können Gebiete ausgewiesen werden, in denen Steinsalz in steiler Lagerung alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 2).

Ergebnis

Durch die Bearbeitung der Mindestanforderungen auf die Salzstrukturen Brandenburgs und Berlins konnten 21 Gebiete ermittelt werden. Davon liegt jeweils ein Salzdiapir teilweise in Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen. Alle Gebiete sind in Tabelle 4 mit dem Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und minimaler und maximaler Tiefe aufgelistet und deren Lage ist Abbildung 2 zu entnehmen. In Berlin liegen keine Gebiete mit Steinsalz in steiler Lagerung.

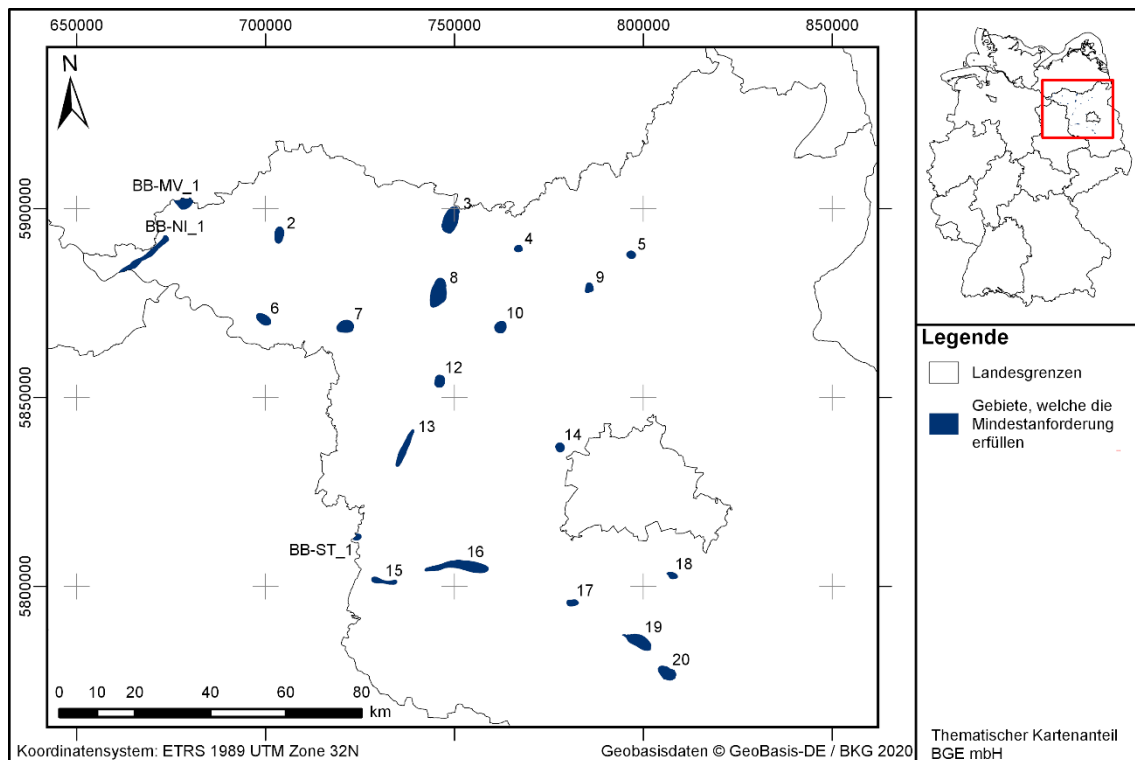


Abbildung 2: Überblick über die Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, auf Basis der Salzstrukturen in Brandenburg. Gebiete, die nur mit Nummern bezeichnet sind, haben den Präfix „MG_d_z_BB“, während die randlichen Gebiete den Präfix „MG_d_z_“ besitzen und z. T. in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern oder Sachsen-Anhalt liegen (Tabelle 4)

Tabelle 4: *Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage u. GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzschwebe)*

ID-Mindestanforderungs- gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_BB_2	Helle	850	650	1500
MG_d_z_BB_3	Zechlin	870	630	1500
MG_d_z_BB_4	Dollgow	1080	420	1500
MG_d_z_BB_5	Storkow	700	800	1500
MG_d_z_BB_6	Bad Wilsnack	1070	430	1500
MG_d_z_BB_7	Barenthin	990	510	1500
MG_d_z_BB_8	Netzeband	810	690	1500
MG_d_z_BB_9	Kleinmutz	800	700	1500
MG_d_z_BB_10	Wulkow	850	650	1500
MG_d_z_BB_12	Friesack	990	510	1500
MG_d_z_BB_13	Kotzen	850	650	1500
MG_d_z_BB_14	Schönwalde	890	610	1500
MG_d_z_BB_15	Viesen	760	740	1500
MG_d_z_BB_16	Lehnin	530	970	1500
MG_d_z_BB_17	Blankensee	1090	410	1500
MG_d_z_BB_18	Mittenwalde	960	540	1500
MG_d_z_BB_19	Sperenberg	1180	320	1500
MG_d_z_BB_20	Paplitz	1010	490	1500
MG_d_z_BB_MV_1	Werle	570	930	1500
MG_d_z_BB_ST_1	Demsin	480	1020	1500
MG_d_z_BB_NI_1	Gorleben/ Rambow	800	600	1500

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 5 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 5: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank*

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Beschreibung
11878605	7872		Brandenburg 3D	3D-Modell (Schilling et al. 2018)
11842726	7632		Strukturumrisse_500m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7633		Strukturumrisse_1000m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7634		Strukturumrisse_1500m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7635		Strukturumrisse_2000m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)

1.1.2 Mecklenburg-Vorpommern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23°StandAG für Steinsalz in steiler Lagerung in der Einheit Zechstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten können. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Mecklenburg-Vorpommern (MV). Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 BGE 2020j) die salinaren Gesteinsabfolgen des Oberrotliegend und Zechstein in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Niveauschnitte) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in BGE (2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Im Untergrund Norddeutschlands existieren über 400 Salzdiapire (Salzstöcke und Salzmauern), die innerhalb des Norddeutschen Beckens (NDB) liegen. Die Salzdiapire werden aus salinaren Ablagerungen des Zechstein sowie in einigen Bereichen zusätzlich von Salinargesteinen des Oberrotliegend aufgebaut (Pollok et al. 2016).

Das Ende der variszischen Gebirgsbildung, im späten Karbon, markiert weltweit eine geologische Zeitwende, so dass während des Perm (296–251 Millionen Jahren) nahezu alle kontinentalen Platten (u. a. Gondwana und Laurasia) im Superkontinent Pangäa vereint waren (Meschede 2018). Im Zuge der weiteren geologischen Entwicklung in Mitteleuropa fand im frühen Perm der Übergang von einem kompressiven zu einem extensiven tektonischen Regime statt. Als Resultat der Krustendehnung und der darauffolgenden thermischen Beckensubsidenz im mittleren Perm bildeten sich innerhalb des Superkontinents Pangäa typische intrakontinentale Beckensysteme, wie z. B. das Zentraleuropäische Becken (Meschede 2018). Das Norddeutsche Becken gehört als Teil des südlichen Permbeckens dem intrakontinentalen Zentraleuropäischen Beckensystem an (Maystrenko et al. 2008).

Durch eine rasche marine Flutung des intrakontinentalen Rotliegend-Beckens entwickelte sich das oberpermische marin geprägte Zechsteinbecken. Je nach Beckenposition entstanden durch zyklische Eindunstung von Meerwasser bis zu sieben Zechstein-

Salinarformationen im Zentrum und vier bis fünf an den Beckenrändern des NDB (Käding 2005a; Käding 2005b). Ein vollständiger mariner Salinarzyklus beginnt idealerweise mit tonigen Sedimenten, mit darauffolgenden karbonatischen (Kalkstein), sulfatischen (Gips und Anhydrit) und abschließend chloridischen Ablagerungen (Stein- und Kalisalze), die entsprechend ihrer stoffspezifischen Wasserlöslichkeit ausfallen („Eindampfungsabfolge“ (z. B. Warren 2015)). Die mächtigsten Steinsalzablagerungen finden sich in dem sogenannten Staßfurt-Steinsalz (z2-Hauptsalz) im Staßfurt-Zyklus (z2), aus dem auch der Hauptanteil des Salzes in den Zechsteinsalzstöcken stammt (Frisch & Kockel 2004). Ursprüngliche Mächtigkeiten des gesamten Zechstein werden mit bis zu 1500 m im zentralen Beckenbereich rekonstruiert (Baldschuhn et al. 2001; Scheck-Wenderoth et al. 2008). Die Zechstein-Mächtigkeit durch Salzakkumulation innerhalb von Salzdiapiren liegt in Norddeutschland bei ca. 4500 m (Baldschuhn et al. 2001). Die akkumulierte Mächtigkeit des Oberrotliegend- und Zechsteinsalinar innerhalb von Doppelsalinaren liegt bei über 7000 m (Baldschuhn et al. 2001).

Die Entwicklung von Salzstrukturen verläuft mehrphasig und beginnt mit stratiformen (flach lagernden) Salzschieben. Diese können zu plastischem Kriechen in Richtung der größten Druckentlastung angeregt werden und in ihrer Mächtigkeit zu sogenannten Salzkissen anschwellen. Die Genese der Salzstrukturen ist durch die Ausprägung der Randsenken ersichtlich, falls diese nicht erodiert wurden (Trusheim 1960). Bei fortschreitender Salzakkumulation ist das Deckgebirge durch Dehnung und Erosion beansprucht und der Salzzustrom kann entlang von Schwächezonen aufsteigen (Hudec & Jackson 2007). Das diapirisch durchgebrochene Salz intrudiert in die mesozoisch-känozoischen Sedimente und bildet Salzstöcke oder langgestreckte Salzmauern aus (Frisch & Kockel 2004). Für den weiteren Aufstieg des Salzdiapirs muss die Aufstiegs geschwindigkeit des Salzes größer als die Sedimentationsrate der Deckgebirgsschichten sowie die Ablagerungsrate im Dachbereich sein (Hudec & Jackson 2007). Das Ende der Phase des „aktiven Diapirismus“ wird zeitlich belegt durch das Vorhandensein von Deckgebirgsschichten, die den Salzdiapir vollständig und mit gleicher Mächtigkeit überdecken. Bei erneutem Salzzustrom („Nachschubstadium“) wird das Deckgebirge aufgewölbt, was mit der Bildung von Scheitelstörungen einhergehen kann (Frisch & Kockel 2004). Die diapirische Phase endet, wenn die mobilen Steinsalzvorkommen in den Kissenfüßen aufgebraucht sind. Durch Ablagerung der löslichen Bestandteile im Dachbereich von Salzstrukturen wird das Hutgestein aus den unlöslichen Rückständen gebildet.

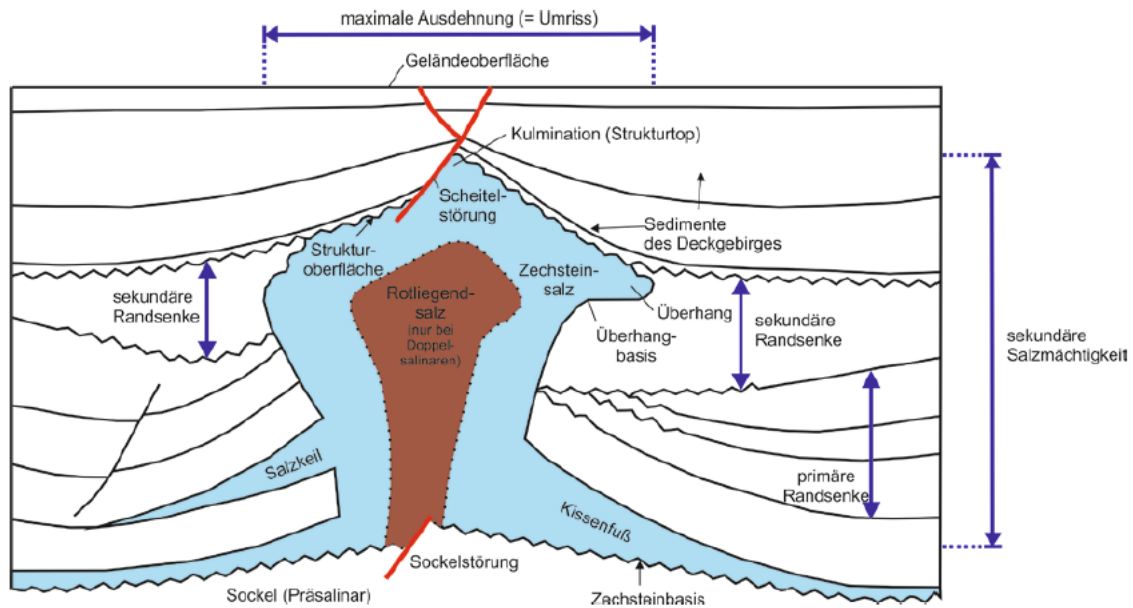


Abbildung 3: Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)

Das NDB ist charakterisiert durch einen tektonischen Stockwerksbau mit Bruchschollentektonik im subsalinaren Sockel und einem komplex strukturiertem Deckgebirge mit Salzstrukturen, die mechanisch durch das Zechstein-Salinar entkoppelt sind (Kockel 1999). Die Beckenentwicklung ist daher eng mit der Genese der Salzstrukturen verknüpft. Abhängig von der Beckenposition und dem regionaltektonischen Umfeld weisen die norddeutschen Salzstrukturen eine zeitlich und räumlich sehr variable Entwicklungsgeschichte auf (Kockel 1998). Sie unterscheiden sich zusätzlich durch ihre äußere Form und den Internbau. Die Hauptphasen der Diapirbildung erfolgten im Keuper und im Mitteljura bis zur Unterkreide (Scheck-Wenderoth et al. 2008). Während der Oberkreide änderte sich das Spannungsregime in eine Nordnordost-Südsüdwest gerichtete Einengung, die die Salzdiapirbildung vor allem in den herzynischen streichenden Sockelstörungen vorantrieb (Baldschuhn et al. 2001). Der mehrphasige Salzaufstieg und die unterschiedlichen lithologischen Zusammensetzungen führen zu einem komplexen Internbau mit intensiver Faltentektonik (de Boer 1971). Dennoch weisen die meisten Zechstein-Diapire eine Zweiteilung auf: einen Kern aus weitestgehend homogenem Steinsalz der Staßfurt-Formation und jüngere, weniger mobile Salinargesteine der jüngeren Zyklen, die durch höhere Anhydritanteile charakterisiert sind (Pollok et al. 2016).

Eingangsdaten

Alle Eingangsdaten(-sätze) sind in Tabelle 6 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 6: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname
1	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturumrisse_500m (von Goerne et al. 2016)
2	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturumrisse_1000m (von Goerne et al. 2016)
3	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturumrisse_1500m (von Goerne et al. 2016)
4	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturumrisse_2000m (von Goerne et al. 2016)
5	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM200
6	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)
7	DE	BGR		pdf	InSpEE-Bericht, Anhang 3-1, 3-2 (von Goerne et al. 2016)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Mecklenburg-Vorpommern hat kein geologisches 3D-Modell an die BGE übergeben. Daher wurden die Salzstrukturen von der BGE erstellt. Basierend auf Salzstrukturschnitten und Kulminationspunkten des InSpEE-Berichts (Pollok et al. 2016; Gast & Riesenberg 2016; von Goerne et al. 2016) wurden Salzstrukturen (ausschließlich Salzdiapire) modelliert.

Die Eingangsdaten aus dem InSpEE-Bericht sind nicht länderbezogen, sondern für ganz Norddeutschland verfügbar. Es wurden daher Salzstrukturen mit modelliert, die z. T. auch innerhalb des Landesgebietes von Brandenburg und Niedersachsen liegen. Diese Strukturen wurden an der Landesgrenze geschnitten und ausschließlich auf Bereiche innerhalb Mecklenburg-Vorpommerns reduziert.

Die Strukturumrisse der Salzdiapire, die im Rahmen des InSpEE-Projektes entstanden und die in Mecklenburg-Vorpommern liegen, wurden in ArcGIS Pro markiert und die vier Niveaus (500 m u. NN, 1000 m u. NN, 1500 m u. NN und 2000 m u. NN) als Shape-Dateien exportiert (Tabelle 7). Über Import von *Cultural Data* wurden diese Niveauschnitte in SKUA-GOCAD importiert, die bei diesem Schritt als Kurven eingeladen wurden und in die entsprechende Tiefe verschoben (Abbildung 4). Diese Kurven wurden dann zu jeweils einem Teil (*part*) zusammengefügt (*merge*). Im Falle von Salzdiapiren mit mehreren Kulminationspunkten wurde die Trennungslinie zwischen den Strukturen entfernt. Aus der Liste aller untersuchten Salzstrukturen im Norddeutschen Becken des InSpEE-Projekts (von Goerne et al. 2016) wurde der Strukturtop (Kulminationspunkt) in m u. NN des jeweiligen Salzdiapirs entnommen und als Punkt in SKUA-GOCAD die angegebene Tiefe verschoben.

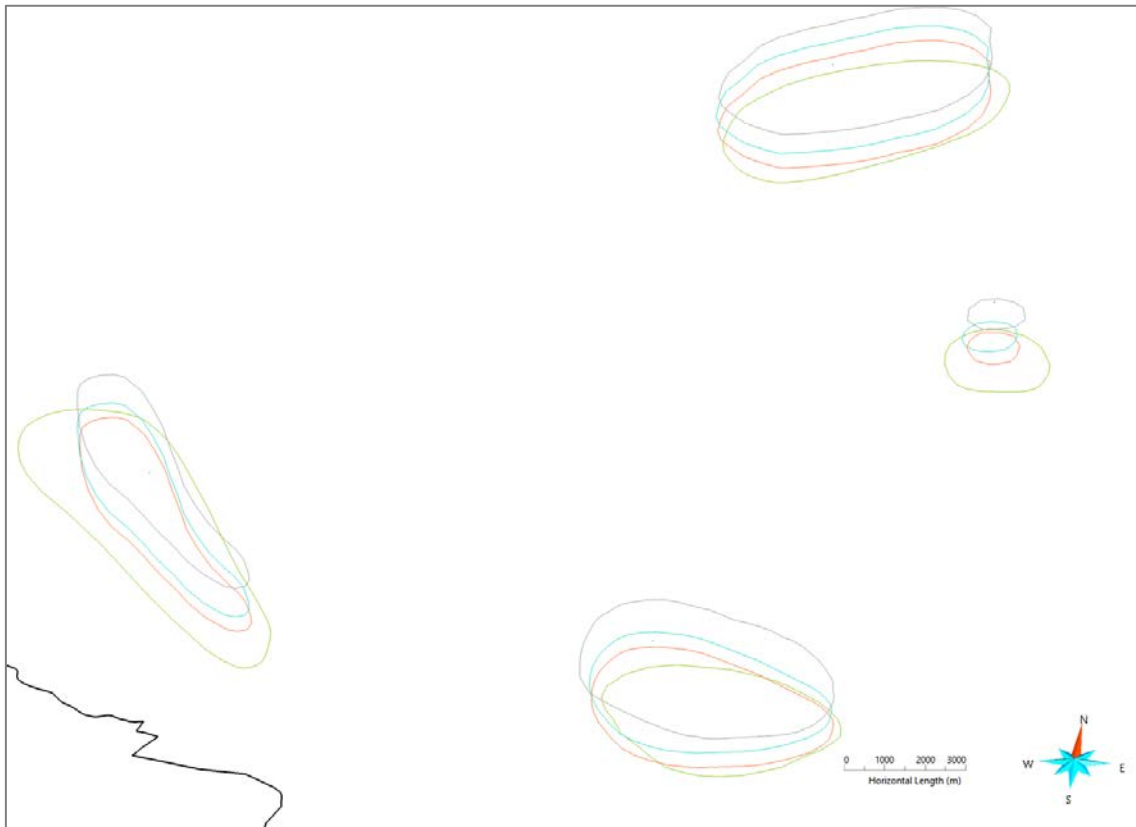


Abbildung 4: Ausschnitt der Datengrundlage für die Modellierung der Salzstrukturen im Süden von Mecklenburg-Vorpommern. Niveauschnitte in 500 m u. NN (grau), 1000 m u. NN (blau), 1500 m u. NN (orange) und 2000 m u. NN (grün) sowie Kulminationspunkte lagen für die Bearbeitung vor. Die Landesgrenze ist in schwarz dargestellt.

Tabelle 7: Auflistung der Salzstrukturen und deren Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) sowie der Strukturtyp aus dem InSpEE-Bericht (von Goerne et al. 2016)

Anzahl der Salzstrukturen	Salzstrukturen	Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) [m u. NN]	Strukturtyp
1	Conow	16	Salzstock
2	Dömitz	1050	Salzstock
3	Gielow	1100	Salzstock
4	Gülze-Sumte	111	Salzstock
5	Kl. Kühren	250	Salzstock
6	Kraak	249	Salzstock
7	Lübtheen	-20	Salzstock
8	Ludwigslust	75	Salzstock

Anzahl der Salzstrukturen	Salzstrukturen	Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) [m u. NN]	Strukturtyp
9	Moeckow	330	Salzstock
10	Nostorf	1000	Salzstock
11	Werle	511	Salzstock
12	Wesenberg	200	Salzstock
13	Wredenhagen	70	Salzstock

Zwischen den Kurven der einzelnen Strukturen in den Tiefen 500 m u. NN bis 2000 m u. NN wurden Flächen über *New_From Curves_Several Curves* erzeugt. Diese Flächen wurden den einzelnen Salzstrukturen zugeordnet. Für die Topfläche wurde eine Fläche innerhalb des höchsten Niveauschnitts erzeugt, *Constraints* auf die *Border* gesetzt, die keine Bewegung in allen Richtungen erlauben und der Kulminationspunkt als *Control Point* definiert. Die Triangulation der Fläche wurde erst auf Gleichschenkeligkeit der Vermaschung verbessert (*Beautify Triangles for Equilaterality*) und dann wurde die Fläche interpoliert (*Geometry_On Entire Surface*). Für Lübtheen wurden einzelne Knoten im Dachbereich manuell etwas bearbeitet, um eine realistischere Erscheinung zu generieren. Die fertig modellierten Flächen der einzelnen Strukturen wurden als Strukturname mit dem Zusatz „ganz“ gespeichert.

Alle modellierten Salzstrukturen wurden als MV_z_d.ts gespeichert (Abbildung 5) sowie alle Topflächen zu einem Datensatz (MV_z_d_Top.ts) vereint.

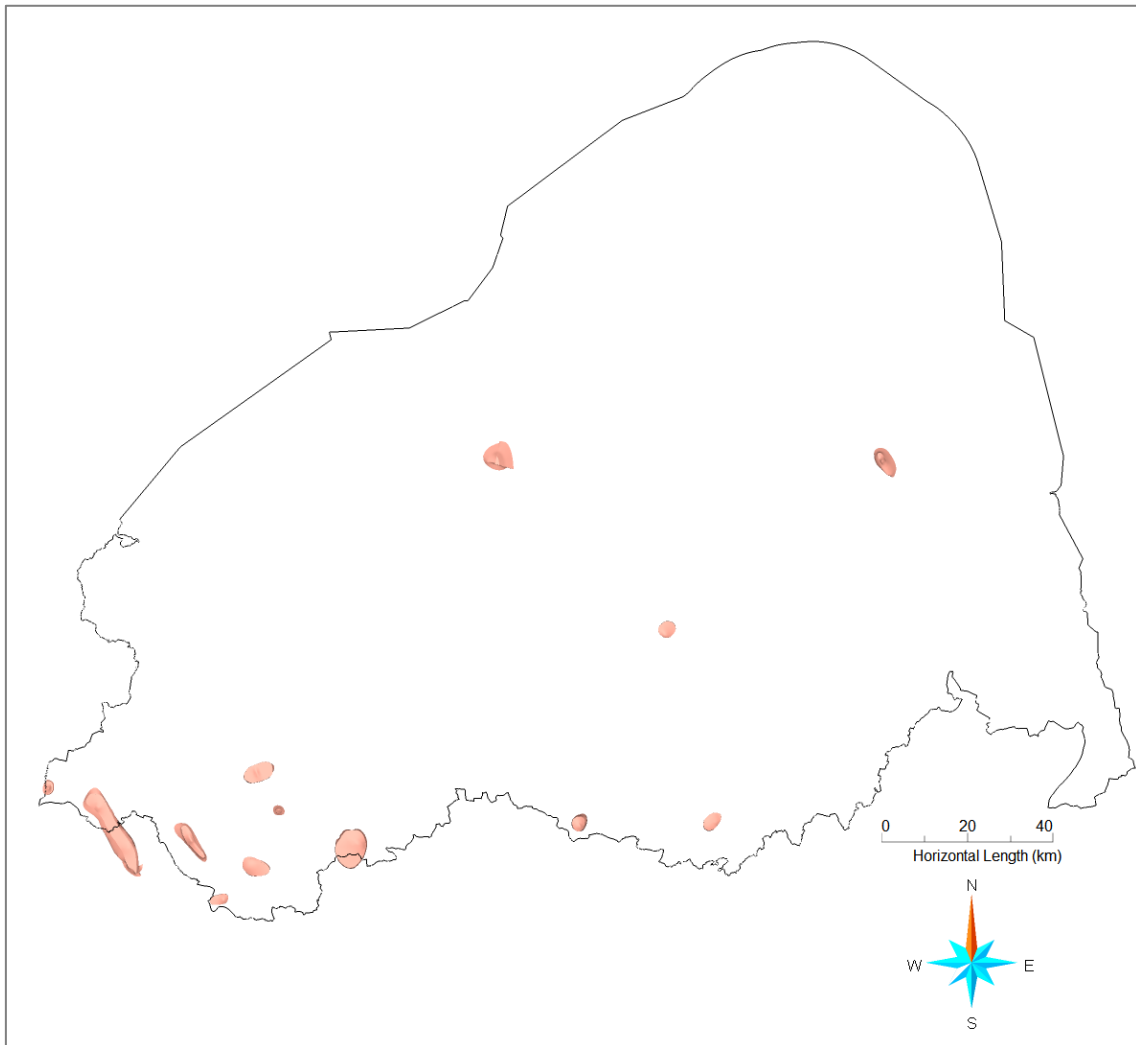


Abbildung 5: Überblick über die modellierten Salzstrukturen in Mecklenburg-Vorpommern und angrenzenden Bundesländern. In schwarz ist die Landesgrenze von Mecklenburg-Vorpommern dargestellt.

Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen sind in Tabelle 8 beschrieben.

Tabelle 8: Vorgehensweise zur Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Topflächen der Salzstrukturen kopieren, Ränder vergrößern und um 300 m absenken	MV_z_d_Top_-300.ts
b) DGM 2x kopieren und Kopie um 300 m und 1500 m absenken	DGM_-300m.ts, DGM_-1500m.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Topflächen aus a) mit DGM_-300m auf Tiefenlage prüfen	
d) Hüllflächen der Salzstrukturen kopieren und mit DGM_-1500m verschneiden	MV_z_d_cut_DGM-1500.ts
e) Abgesenkte Topflächen aus a) mit ursprünglicher Hüllfläche aus d) verschneiden und umgekehrt	MV_z_d_cut_DGM-1500_mutualcut.ts, MV_z_d_Top_-300_mutualcut.ts
f) Ursprüngliches Top und abgesenkte Flanken löschen sowie eine neue Fläche aus abgesenkten Salzstrukturtops und originalen Flanken generieren	MV_z_d_bearb.ts
g) Distanz/Mächtigkeit zwischen Hüllfläche aus f) und DGM_-1500m berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	MV_z_d_bearb_Thickness100m.ts
h) Neue Fläche aus g) erstellen und Attribut „Tiefenlage“ erzeugen	MG_d_z_MV_1.ts, MG_d_z_MV_2.ts, etc.
3. Export aller Gebiete aus j) als DXF-Datei für die Maximalausdehnungen und txt-Datei im ASCII-Format mit den Attributen „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“	MG_d_z_MV.dxf MG_d_z_MV.txt

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 StandAG Abs. 5

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selbst sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993).

Da in allen ausgewiesenen Gebieten die lithostratigraphischen Einheiten z2NA (Staßfurt-Steinsalz), z3NA (Leine-Steinsalz) und/oder z4NA (Aller-Steinsalz) verbreitet sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als erfüllt angesehen. Der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, gibt für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ eine günstige Bewertung an. Diese ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger (BGE 2020b).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für Steinsalz in steiler Lagerung in den verbleibenden Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Salinars wurde im dreidimensionalen Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die gesamte Salzstruktur zusammen (inklusive des Hutgesteins). Einige Salzstrukturen besitzen einen flach zulaufenden Überhang, auf den das 100 m-Kriterium aus technischer Machbarkeit nicht angewendet werden konnte. Dies ist jedoch zu vernachlässigen, da für die weitere Betrachtung der Teilgebiete die zentralen Bereiche bevorzugt werden, da dort ein allseitiger Umschließungsgrad gegeben ist und davon ausgegangen wird, dass im Zentrum eher geringere Vorkommen von nicht wirtsgesteinsrelevanten Salinargesteinen anzutreffen sind (Pollok et al. 2016).

- Technische Umsetzung

Als Untergrenze für die Berechnung der vertikalen Mächtigkeiten der Salzstrukturen funktionierte eine Kopie des DGM_-1500 m. Mit der Funktion *Compute_Vertical Thickness* wurde die vorab angelegte Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Hüllflächen der Salzstrukturen berechnet (Tabelle 8 2g). Die Eigenschaft „Mächtigkeit [m]“ der Salzstrukturen wurde mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden Kurven erzeugt (*New Curve_From Contour Lines*), mit denen die Umhüllenden verschnitten wurde. Es fiel nun auf, dass bei den vertikal-stehenden Flanken der Salzstrukturen die unteren 100 m zur Basisfläche als geringer 100 m angezeigt wurden, was als Artefakt angesehen werden muss. Strukturen deren Dachbereich sehr tief liegt und von der Konturlinie getroffen wurde, wurden mit dieser geschnitten. Der untere Teil gelöscht.

Zu vermerken ist hierbei, dass im Falle von Überhängen und weiteren Unterschreitungen der 100 m Mindestmächtigkeiten, die in Hüllflächen der Salzdiapire auftreten können, aus technischen Gründen keine weitere Bearbeitung dieser Gebiete erfolgte. Im nachfolgenden Prozess zur weiteren Einengung der Teilgebiete auf Standortregionen ist eine Distanz zu den Flanken der Salzstöcke einzuhalten, sodass diese ungenügend mächtigen Bereiche nicht weiter betrachtet werden.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Als maximale Suchteufe wurden 1500 m festgelegt (BGE 2020m). Als Salzschwebe wurden 300 m oberhalb des potentiellen ewG gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG berücksichtigt.

- Technische Umsetzung

In vielen Fällen konnte das Kriterium der 300-m-Salzschwebe erreicht werden indem die Topfläche dupliziert, um 1000 m an den Rändern vergrößert (*extent*) und um 300 m in die Tiefe verschoben wurde (Tabelle 8, 2a). Mit dieser Topfläche wurde ein Duplikat der Salzstruktur, die in unveränderte Tiefe blieb, geschnitten (*mutual cut*, Tabelle 8 2e). Der

obere Teil der Salzstrukturflanke sowie der überschüssige, äußere Teil der Topfläche wurden gelöscht (*Part_Delete Selection*, Tabelle 8 2f). Salzstrukturen deren laterale Erstreckung ins Liegende breiter wird konnten komplett 300 m in Tiefe verschoben werden, um das Kriterium zu erfüllen.

Für Salzstrukturen mit komplizierter Geometrie musste ein gesondertes Vorgehen gewählt werden. Die Salzstruktur wurde kopiert und 300 m in die Tiefe verschoben. Die Originalfläche und die 300 m-tiefere Fläche wurden miteinander verschnitten und daraus eine Kurve erzeugt (*Curve_New from Surfaces_Intersection*). Aus dieser Kurve wurde eine Fläche erstellt, interpoliert und um 50 m erweitert. Mit dieser neuen Fläche wurde nun die kopierte Originalfläche verschnitten und der obere Teil entfernt. Dieser Vorgang wurde für die 300 m versetzte Fläche ebenfalls durchgeführt und der untere Teil entfernt. Um den verbleibenden oberen und unteren Teil passend aufeinander zu ziehen, wurden eine neue Fläche aus beiden Flächen generiert, *Border Extremities* auf die gegenüberliegenden Seiten gesetzt, die Grenzflächen miteinander verbunden (*Constraints on Border_Set Vectorial Link*) und aufeinander gezogen (*Part_Sew Borders Using FVL Constraints*).

Das Digitale Geländemodell (DGM) für Mecklenburg-Vorpommern wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe verschoben (*Compute_On Object: z.B. Z = Z-300;*) (Tabelle 8, 2b). Mit dem DGM_-300m wurde die Tiefenlage kontrolliert (Tabelle 8, 2c). Mit dem DGM_-1500 m wurde die Flächen der Salzstrukturen ohne Salzschwebe geschnitten und die Bereich unterhalb 1500 m u. GOK gelöscht (Tabelle 8 2d). Die Eigenschaft „Tiefenlage“ wurde den Flächen hinzugefügt.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einflusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Salz in steiler Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Automatisiert können Flächen mit geringerer Ausbreitung in der länderübergreifenden Bearbeitung final gelöscht werden.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Mecklenburg-Vorpommern können Gebiete ausgewiesen werden, in denen Steinsalz in steiler Lagerung alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 6).

Ergebnis

Durch die Bearbeitung der Salzstrukturen Mecklenburg-Vorpommerns konnten acht Gebiete ermittelt werden, welche voraussichtlich alle Mindestanforderungen erfüllen. Abbildung 6 zeigt einen Überblick über die Mindestanforderungsgebiete. Die Gebiete wurden unter MG_d_z_MV gespeichert und sind in Tabelle 9 mit Strukturname, maximaler Mächtigkeit sowie der minimalen und maximalen Tiefe unter der Geländeoberkante aufgelistet. Die Salzstrukturen, die über die Landesgrenze von Mecklenburg-Vorpommern hinausreichen, wurden an der Landesgrenze geschnitten und wurden mit dem jeweiligen Landeskürzel versehen (z. B. MG_d_z_MV_NI_1).

Die maximalen Mächtigkeiten der Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, liegen zwischen 570 m und 1100 m. Die geringste minimale Tiefe liegt bei 390 m und die maximale Tiefenlage wurde durch das Tiefenkriterium auf maximal 1500 m u. GOK beschränkt.

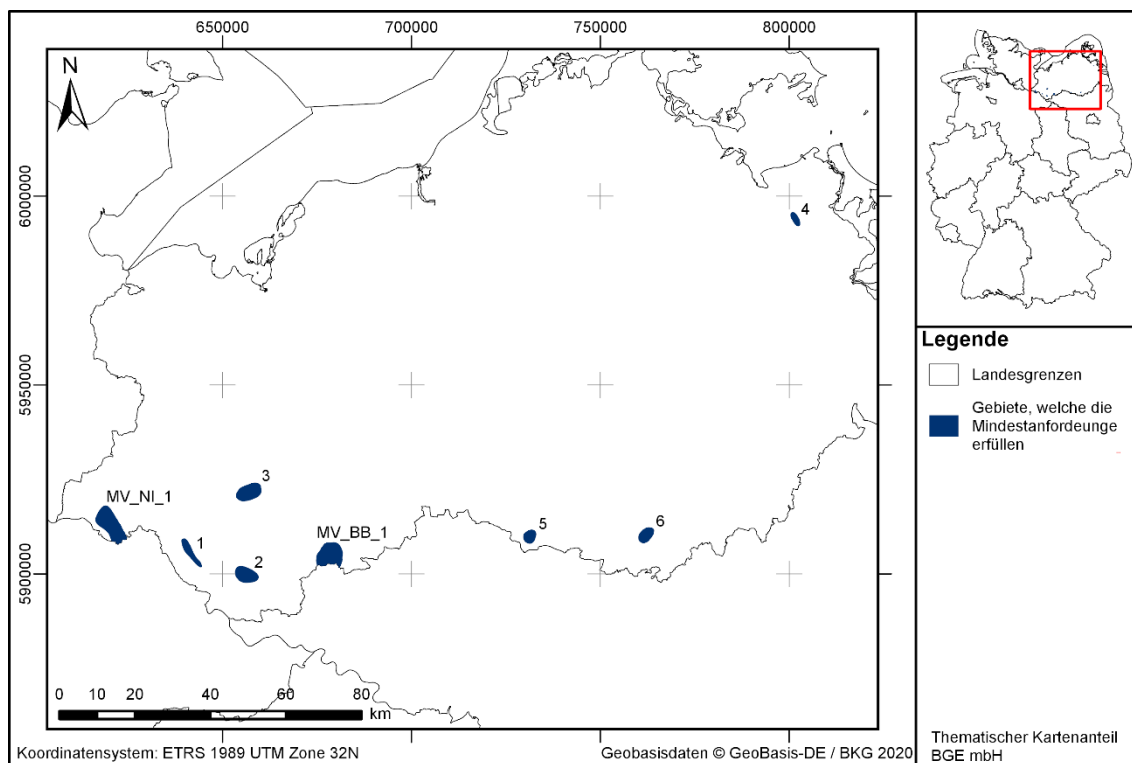


Abbildung 6: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen. Die Benennungen der Gebiete (abgebildet ohne den Präfix „MG_d_z_MV“) ist Tabelle 9 zu entnehmen. Die randlichen Gebiete haben den Präfix „MG_d_z“.

Tabelle 9: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage u. GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzscheibe)

ID-Mindestanforderungs- gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_MV_1	Lübtheen	1100	390	1500

ID-Mindestanforderungs- gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_MV_2	Conow	1000	430	1500
MG_d_z_MV_3	Kraak	900	610	1500
MG_d_z_MV_4	Moeckow	850	670	1500
MG_d_z_MV_5	Wredenhagen	1050	470	1500
MG_d_z_MV_6	Wesenberg	900	590	1500
MG_d_z_MV_BB_1	Werle	570	930	1500
MG_d_z_MV_NI_1	Kl. Kühren/ Gülze- Sumte	1100	420	1500

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 10 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 10: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Beschreibung
11842726	7632		Strukturumrisse_500m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7633		Strukturumrisse_1000m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7634		Strukturumrisse_1500m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7635		Strukturumrisse_2000m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)

1.1.3 Niedersachsen, Bremen und Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23°StandAG für Steinsalz in steiler Lagerung in den Einheiten Zechstein und Oberrotliegend, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten können. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Niedersachsen, Hamburg und Bremen (NI, HH, HB). Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 BGE 2020j) die salinaren Gesteinsabfolgen des Oberrotliegend und Zechstein in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Niveauschnitte) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, Bremen und Hamburg, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in BGE (2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Im Untergrund Norddeutschlands existieren über 400 Salzdiapire (Salzstöcke und Salzmauern), die innerhalb des Norddeutschen Beckens (NDB) liegen. Die Salzdiapire werden aus salinaren Ablagerungen des Zechstein sowie in einigen Bereichen zusätzlich von Salinargesteinen des Oberrotliegend aufgebaut (Pollok et al. 2016).

Das Ende der variszischen Gebirgsbildung, im späten Karbon, markiert weltweit eine geologische Zeitwende, so dass während des Perm (296–251 Millionen Jahren) nahezu alle kontinentalen Platten (u. a. Gondwana und Laurasia) im Superkontinent Pangäa vereint waren (Meschede 2018). Im Zuge der weiteren geologischen Entwicklung in Mitteleuropa fand im frühen Perm der Übergang von einem kompressiven zu einem extensiven tektonischen Regime statt. Als Resultat der Krustendehnung und der darauffolgenden thermischen Beckensubsidenz im mittleren Perm bildeten sich innerhalb des Superkontinents Pangäa typische intrakontinentale Beckensysteme, wie z. B. das Zentraleuropäische Becken (Meschede 2018). Das Norddeutsche Becken gehört als Teil des südlichen Permbeckens dem intrakontinentalen Zentraleuropäischen Beckensystem an (Maystrenko et al. 2008).

Während des Oberrotliegend in der Havel- und Elbe-Subgruppe entstanden im zentralen Teil des südlichen Permbeckens durch zyklische Eindunstung (Evaporation) eines kontinentalen Salzsees Steinsalzlagen (mit geringmächtigen Anhydrit- und Kalklagen) im

Wechsel mit Ton- und Siltsteinen (u. a. Legler 2006). Während die salinaren Ablagerungen der Havel-Subgruppe nur auf kleine Gebiete im Beckenzentrum beschränkt sind, umspannt der Sedimentationsraum der Elbe-Subgruppe im Westen das zentrale Norddeutsche Becken im Bereich der heutigen Nordsee bis nach Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg im Süden und Osten (u. a. Plein & Van Adrichem Boogaert 1995).

Durch eine rasche marine Flutung des intrakontinentalen Rotliegend-Beckens entwickelte sich das oberpermische marin geprägte Zechsteinbecken. Je nach Beckenposition entstanden durch zyklische Eindunstung von Meerwasser bis zu sieben Zechstein-Salinarformationen im Zentrum und vier bis fünf an den Beckenrändern des NDB (Käding 2005a; Käding 2005b). Ein vollständiger mariner Salinarzyklus beginnt idealerweise mit tonigen Sedimenten, mit darauffolgenden karbonatischen (Kalkstein), sulfatischen (Gips und Anhydrit) und abschließend chloridischen Ablagerungen (Stein- und Kalisalze), die entsprechend ihrer stoffspezifischen Wasserlöslichkeit ausfallen („Eindampfungsabfolge“ (z. B. Warren 2015)). Die mächtigsten Steinsalzablagerungen finden sich in dem sogenannten Staßfurt-Steinsalz (z2-Hauptsalz) im Staßfurt-Zyklus (z2), aus dem auch der Hauptanteil des Salzes in den Zechsteinsalzstöcken stammt (Frisch & Kockel 2004). Ursprüngliche Mächtigkeiten des gesamten Zechstein werden mit bis zu 1500 m im zentralen Beckenbereich rekonstruiert (Baldschuhn et al. 2001; Scheck-Wenderoth et al. 2008). Die Zechstein-Mächtigkeit durch Salzakkumulation innerhalb von Salzdiapiren liegt in Norddeutschland bei ca. 4500 m (Baldschuhn et al. 2001). Die akkumulierte Mächtigkeit des Oberrotliegend- und Zechsteinsalinar innerhalb von Doppelsalinen liegt bei über 7000 m (Baldschuhn et al. 2001).

Die Entwicklung von Salzstrukturen verläuft mehrphasig und beginnt mit stratiformen (flach lagernden) Salzschichten. Diese können zu plastischem Kriechen in Richtung der größten Druckentlastung angeregt werden und in ihrer Mächtigkeit zu sogenannten Salzkissen anschwellen. Die Genese der Salzstrukturen ist durch die Ausprägung der Randsenken ersichtlich, falls diese nicht erodiert wurden (Trusheim 1960). Bei fortschreitender Salzakkumulation ist das Deckgebirge durch Dehnung und Erosion beansprucht und der Salzzustrom kann entlang von Schwächezonen aufsteigen (Hudec & Jackson 2007). Das diapirisch durchgebrochene Salz intrudiert in die mesozoisch-känozoischen Sedimente und bildet Salzstöcke oder langgestreckte Salzmauern aus (Frisch & Kockel 2004). Für den weiteren Aufstieg des Salzdiapirs muss die Aufstiegs geschwindigkeit des Salzes größer als die Sedimentationsrate der Deckgebirgsschichten sowie die Ablagerungsrate im Dachbereich sein (Hudec & Jackson 2007). Das Ende der Phase des „aktiven Diapirismus“ wird zeitlich belegt durch das Vorhandensein von Deckgebirgsschichten, die den Salzdiapir vollständig und mit gleicher Mächtigkeit überdecken. Bei erneutem Salzzustrom („Nachschubstadium“) wird das Deckgebirge aufgewölbt, was mit der Bildung von Scheitelstörungen einhergehen kann (Frisch & Kockel 2004). Die diapirische Phase endet, wenn die mobilen Steinsalzvorkommen in den Kissenfüßen aufgebraucht sind. Durch Ablagerung der löslichen Bestandteile im Dachbereich von Salzstrukturen wird das Hutgestein aus den unlöslichen Rückständen gebildet.

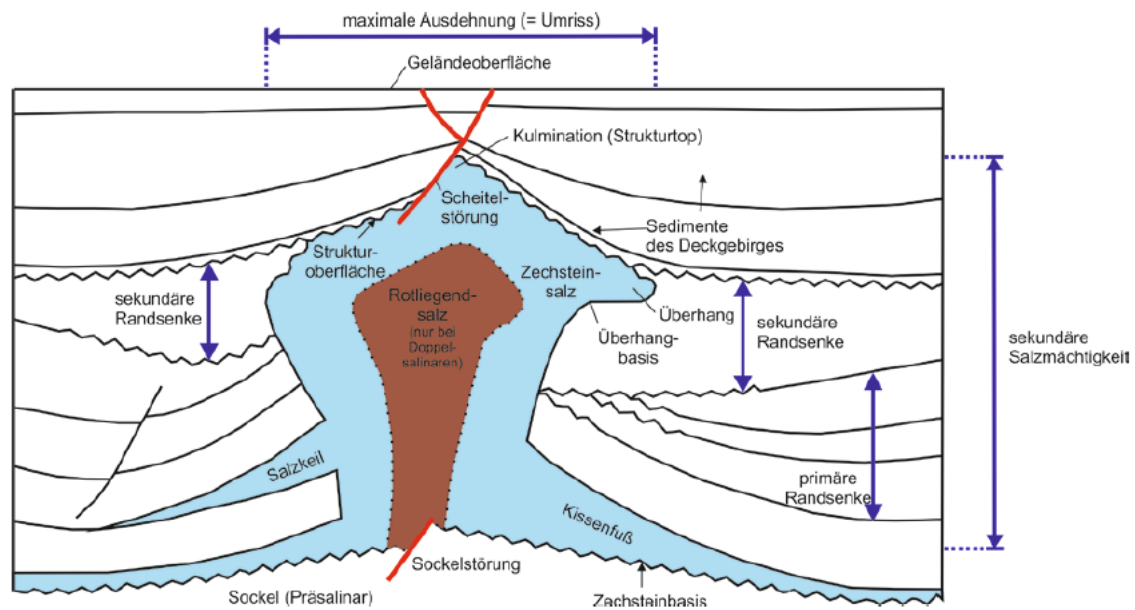


Abbildung 7: Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)

Im Norddeutschen Becken kommen neben Salzstrukturen aus Zechsteinsalinaren sogenannte Doppelsalinare vor, die aus permischen Salinargesteinen des Oberrotliegend und Zechstein aufgebaut sind. In den Randsenken der Doppelsalinare wurden teilweise Keupersalinare abgelagert, die zu Salzkissen mobilisiert wurden. Deren Abgrenzung zu den permischen Salzstrukturen ist nicht eindeutig zu ziehen, weshalb diese Strukturen auch als Mehrfachsalinare bzw. Tripelsalinare bezeichnet werden (Pollok et al. 2016). Die Verbreitung der Doppelsalinare beschränkt sich auf Teile der Nordsee und auf den Unterelbe-Raum in Schleswig-Holstein, Hamburg und im nördlichen Niedersachsen (Pollok et al. 2016). Die Entwicklung der Doppelsalinare im Unterelbe-Raum ist stark an die Entwicklung des über 10 km tief eingesunkenen Glückstadt-Grabens geknüpft (Maystrenko et al. 2005). Die Doppelsalinare liegen meist als langgestreckte Salzmauern vor, die Sockelstörungen auflagern (Baldschuhn et al. 2001; Pollok et al. 2016).

Das NDB ist charakterisiert durch einen tektonischen Stockwerksbau mit Bruchschollentektonik im subsalinaren Sockel und einem komplex strukturiertem Deckgebirge mit Salzstrukturen, die mechanisch durch das Zechstein-Salinare entkoppelt sind (Kockel 1999). Die Beckenentwicklung ist daher eng mit der Genese der Salzstrukturen verknüpft. Abhängig von der Beckenposition und dem regionaltektonischen Umfeld weisen die norddeutschen Salzstrukturen eine zeitlich und räumlich sehr variable Entwicklungsgeschichte auf (Kockel 1998). Sie unterscheiden sich zusätzlich durch ihre äußere Form und den Internbau. Die Hauptphasen der Diapirbildung erfolgten im Keuper und im Mitteljura bis zur Unterkreide (Scheck-Wenderoth et al. 2008). Während der Oberkreide änderte sich das Spannungsregime in eine Nordnordost-Südsüdwest gerichtete Einengung, die die Salzdiapirbildung vor allem in den herzynischen streichenden Sockelstörungen vorantrieb (Baldschuhn et al. 2001). Der mehrphasige Salzaufstieg und die un-

terschiedlichen lithologischen Zusammensetzungen führen zu einem komplexen Internbau mit intensiver Falten tektonik (de Boer 1971). Dennoch weisen die meisten Zechstein-Diapire eine Zweiteilung auf: einen Kern aus weitestgehend homogenem Steinsalz der Staßfurt-Formation und jüngere, weniger mobile Salinargesteine der jüngeren Zyklen, die durch höhere Anhydritanteile charakterisiert sind (Pollok et al. 2016). Der Internbau von Doppelsalinaren wird generell mit einem Oberrotliegendensalinar („Haselgebirge“) im Kern und mit randlich umgebenden jüngeren Zechsteinsalinar beschrieben (Kockel & Krull 1995). Durch die salztektonischen Prozesse ist das Gefüge des Oberrotliegendensalinar homogenisiert und weist siliziklastische Anteile zwischen 2 % und 50 % auf (Henneberg et al. 2018).

Eingangsdaten

Alle Eingangsdaten(-sätze) sind in Tabelle 11 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 11: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname
1	NI	LBEG	11842295/ 7775	shp	Geotektonischer Atlas 3D (Bombien et al. 2012)
2	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM200
3	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)
4	DE	BGR		pdf	InSpEE-Bericht (von Goerne et al. 2016)
5	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturumrisse_500m (von Goerne et al. 2016)
6	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturumrisse_1000m (von Goerne et al. 2016)
7	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturumrisse_1500m (von Goerne et al. 2016)
8	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturumrisse_2000m (von Goerne et al. 2016)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Das hier verwendete Grundmodell für Niedersachsen ist das Geotektonischer Atlas 3D-Modell (GTA3D) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG) (Bombien et al. 2012). Das GTA3D-Modell basiert auf den Daten des Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland (Baldschuh et al. 2001) und bildet 14 stratigraphische Einheiten (von Zechstein bis Pliozän sowie ergänzend die Quartärbasisfläche) ab. Das Modell umfasst auch das Landesgebiet der Freien Hansestädte Hamburg und Bremen. Im südlichen Niedersachsen wurden einzelne Salzstrukturen auf Basis von Niveauschnitten aus dem InSpEE-Projekt modelliert (Pollok et al. 2016; Gast & Riesenberg 2016; von Goerne et al. 2016), da diese Salzdiapire nicht Teil des GTA3D-Modells sind.

Einige der Salzdiapire Niedersachsens grenzen an die Landesgrenze Schleswig-Holsteins, Bremens und Hamburgs. Ein Salzdiapir grenzt an Brandenburg (MG_d_z_NI-BB_1). Auf Brandenburger Seite hingegen findet sich keine direkte Fortsetzung. Vielmehr zeigt das Brandenburger Modell (Schilling et al. 2018) ein Abfallen des Salzspiegels auf Niveau des nicht aufgestiegenen Zechsteins. Diese Diskrepanz wurde durch InSpEE-Niveauschnitte aufgelöst. Es wird der Interpretationsansatz der zusammenhängenden Salzmauer verfolgt und die beiden Gebiete verbunden.

Die Strukturumrisse der Salzstrukturen (ausschließlich von Salzdiapiren) im südlichen Niedersachsen, die nicht Teil des GTA3D-Modells sind und die im Rahmen des InSpEE-Projektes entstanden, wurden in ArcGIS Pro markiert und die vier Niveaus (500 m u. NN, 1000 m u. NN, 1500 m u. NN und 2000 m u. NN) als Shape-Dateien exportiert (Tabelle 12). Über Import von *Cultural Data* wurden diese Niveauschnitte in SKUA-GOCAD importiert, die bei diesem Schritt als Kurven eingeladen wurden und in die entsprechende Tiefe verschoben (vgl. Abbildung 4). Diese Kurven wurden dann zu jeweils einem Teil (*part*) zusammengefügt (*merge*). Im Falle von Salzdiapiren mit mehreren Kulminationspunkten wurde die Trennungslinie zwischen den Strukturen entfernt. Aus der Liste aller untersuchten Salzstrukturen im Norddeutschen Becken des InSpEE-Projekts (von Goerne et al. 2016) wurde der Strukturtop (Kulminationspunkt) in m u. NN des jeweiligen Salzdiapirs entnommen und als Punkt in SKUA-GOCAD die angegebene Tiefe verschoben.

Tabelle 12 *Liste der Salzstrukturen in Niedersachsen, die auf Basis der InSpEE-Niveauschnitte modelliert wurden, deren Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) sowie der Strukturtyp aus dem InSpEE-Bericht (Anhang 3-1)*

Anzahl der Salzstrukturen	Salzstruktur	Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) [m u. NN]	Strukturtyp
1	Schessinghausen	300	Salzstock
2	Husum	68	Salzstock
3	Bokeloh	50	Salzstock

Anzahl der Salzstrukturen	Salzstruktur	Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) [m u. NN]	Strukturtyp
4	Benthe	-50	Salzstock
5	Weenzen	-166	Salzstock
6	Harriehausen	0	Salzstock
7	Düderode/Oldenrode	0	Salzstock
8	Salzgitter	0	Salzstock
9	Harliberg	200	Salzstock
10	Thiede	0	Salzstock
11	Neindorf	-75	Salzstock
12	Asse	-165	Salzstock
13	Bechtsbüttel	-50	Salzstock
14	Beienrode	100	Salzstock
15	Offlebener Sattel	-100	Salzstock
16	Gülze-Sumte	111	Salzstock
17	Kl. Kühren	250	Salzstock
18	Allertal	0	Salzstock
19	Waddekath	300	Salzstock
20	Blenhorst	70	Salzstock
21	Harliberg	200	Salzstock
22	Landschaftspolder	900	Salzstock
23	Stade	0	Salzstock
24	Kaarßen	700	Salzstock

Zwischen den Kurven der einzelnen Strukturen in den Tiefen 500 m u. NN bis 2000 m u. NN wurden Flächen über *New_From Curves_Several Curves* erzeugt. Diese Flächen wurden den einzelnen Salzstrukturen zugeordnet. Für die Topfläche wurde eine Fläche innerhalb des höchsten Niveauschnitts erzeugt, *Constraints* auf die *Border* gesetzt, die keine Bewegung in allen Richtungen erlauben und der Kulminationspunkt als *Control Point* definiert. Die Triangulation der Fläche wurde erst auf Gleichschenkeligkeit der Vermaschung verbessert (*Beautify Triangles for Equilaterality*) und dann wurde die Fläche interpoliert (*Geometry_On Entire Surface*). Die fertigen Flächen der Salzstrukturen auf Basis der InSpEE-Niveauschnitte wurden zu einem Datensatz zusammengefügt und als NI_d_InSpEE gespeichert.

Zusätzliche Arbeiten mussten noch an der Salzstruktur des Allertals angewendet werden. Diese Salzstruktur stammt, wie in Tabelle 12 gelistet, aus InSpEE Niveauschnitten. Der tiefste Niveauschnitt liegt hier bei 500 m u. NN. Aus dem InSpEE-Datensatz gehen demnach keine Informationen über die Lage unterhalb von 500 m u. NN. Das GTA3D-Modell reicht zwar in dieser Gegend bis zur Grenze zu Sachsen-Anhalt, jedoch ist die Salzstruktur des Allertals nicht Bestandteil des Modells. Laut Best & Zirngast (2002) ist die Zechsteinbasis in einer Teufe von 1000 m bis 1500 m u. NN anzunehmen. Eine ähnliche Tiefenlage zeigt auch die Zechsteinbasis des GTA3D-Modells, weswegen diese auch für weitere Arbeiten und Berechnungen verwendet wurde. Mit dem Dach der Allertal-Salzstruktur wurde verfahren wie in Tabelle 13 dargelegt. Einzig eine Berechnung der Mächtigkeit zur 1500 m in die Tiefe versetzten DGM kann hier nicht angewendet werden, da die Zechsteinbasis hier über 1500 m u. GOK liegt. Daher wurde die Mächtigkeit der Salzstruktur nur bis zur Zechsteinbasis gerechnet. Im nördlichen Teil der Struktur ist gemäß der GTA3D Flächen keine vertikale Verbindung mehr zum Zechstein. Daher wurde hier die Mächtigkeit zur nächsten stratigraphischen Basisfläche gerechnet, die keine Lücke im Bereich des Salzstockes zeigt (Unterer bis Mittlerer Buntsandstein). Ab Schritt 3k) in Tabelle 13 wurde wieder verfahren wie mit allen anderen Gebieten.

Die Salzstruktur Rolfsbüttel-Wendeburg-Vechelde-Broistedt ist im GTA3D nur zum Teil enthalten, daher wurde der südliche Bereich (Broistedt) auf Basis der InSpEE-Daten modelliert. Diese Salzstruktur liegt in diesen zwei separaten Flächen a (nördlich) und b (südlich) vor und wurde erst in der 2D-Bearbeitung vereinigt.

Darauffolgende Arbeitsschritte mit der Gesamtheit aller Salzstrukturen und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen sind in Tabelle 13 beschrieben.

Tabelle 13: Vorgehensweise der Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG25) einladen	
2. Aufteilung der Salzstrukturen in 4 Teile (A, A2, B, B2)	
3. Flächenbearbeitung mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Umhüllungsflächen der Salzstrukturen kopieren und Kopie um 300 m absenken	Salzdaecher.ts, Salzwaende_-300m.ts
b) DGM 2x kopieren und Kopie um 300 m und 1500 m absenken	DGM_grob_-300m, DGM_grob_-1500m.ts
c) Neue Hüllflächen aus a) mit DGM_-300m auf Tiefenlage prüfen	
d) Hüllflächen aus a) mit DGM_-1500 verschneiden	Salzdaecher_-300m_cut1500.ts; Salzwaende_-300m_cut1500.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
e) Für senkrechte Wände: Dächer aus d) mit dazugehörigen unbearbeiteten Wänden verschneiden, ggf. über „extend“ Dächer temporär vergrößern	Salzdaecher_-300m_cut1500.ts; Salzwaende_-300m_cut1500.ts
f) Bei einfallenden Wänden: Abgesenkte Flächen aus b mit ursprünglichen Umhüllungsflächen verschneiden und umgekehrt	Salzdaecher_-300m_cut1500.ts; Salzwaende_-300m_cut1500.ts
g) Ursprüngliches Top und äußere abgesenkten Flanken löschen und aus verbleibenden Teilen neue Flächen generieren	MA_Gebiete_-300m_cut1500_closed.ts
h) Zechsteinbasisfläche einladen und mit DGM_1500 zu einer Fläche vereinen	DGM_grob_1500_Z_basis.ts
i) Distanz/Mächtigkeit zwischen Hüllfläche und DGM_-1500m berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	MA_Gebiete_-300_cut1500_closed_Thickness_CutThick.ts
j) Neue Kurve aus Grenze der Fläche aus g) erstellen, kopieren und auf DGM_-1500 versetzen	Contour_100mThickness.pl, Contour_100mThickness_proj.pl
k) Mit der ursprünglichen Kurve und der versetzten Kurve eine neue Fläche erstellen	
l) Neue Fläche aus i) und k) erstellen und Attribut „Tiefenlage“ erzeugen	MG_d_z_NI_1.ts, MG_d_z_NI_2.ts, ...
4. Export aller Gebiete aus l) als DXF-Datei für Maximalausdehnung und txt-Datei im ASCII-Format mit den Attributen „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“	MG_d_z_NI_1.dxf, MG_d_z_NI_2.dxf, ...

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 StandAG Abs. 5

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selbst sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993).

Da in allen ausgewiesenen Gebieten die lithostratigraphischen Einheiten roNA (Oberrotliegend-Salinar), z2NA (Staßfurt-Steinsalz), z3NA (Leine-Steinsalz) und/oder z4NA (Aller-Steinsalz) verbreitet sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als erfüllt angesehen. Der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der ge-

owissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, gibt für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ eine günstige Bewertung an. Diese ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger (BGE 2020b).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für Steinsalz in steiler Lagerung in den verbleibenden Gebieten in Niedersachsen, Hamburg und Bremen **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Salinars wurde im dreidimensionalen Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die gesamte Salzstruktur zusammen (inklusive des Hutgesteins). Einige Salzstrukturen besitzen einen flach zulaufenden Überhang, auf den das 100 m-Kriterium aus technischer Machbarkeit nicht angewendet werden konnte. Dies ist jedoch zu vernachlässigen, da für die weitere Betrachtung der Teilgebiete die zentralen Bereiche bevorzugt werden, da dort ein allseitiger Umschließungsgrad gegeben ist und davon ausgegangen wird, dass im Zentrum eher geringere Vorkommen von nicht wirtsgesteinsrelevanten Salinargesteinen anzutreffen sind (Pollok et al. 2016).

- Technische Umsetzung

Das DGM_grob_-1500 m fungierte als Untergrenze für die Berechnung der vertikalen Mächtigkeiten der Salzstrukturen, die bei 1500 m u. GOK abgeschnitten wurden, (*Compute_Vertical Thickness*) und erzeugt die Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Flächen der Salzstrukturen (Tabelle 13, 3i). Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ der Salzstrukturen wurde für die Visualisierung ausgewählt und Konturlinien, die eine Mächtigkeit von 100 m anzeigen, eingeschaltet. Aus den 100-m-Konturlinien wurden Kurven erzeugt (*New Curve_From Contour Lines*, Tabelle 13, 3j). Es fiel nun auf, dass bei den vertikal-stehenden Flanken der Salzstrukturen die unteren 100 m zur Basisfläche als geringer 100 m angezeigt wurden, was als Artefakt angesehen werden muss. Folglich wurden sie nicht verschnitten. Flanken, die nach außen hin einfallen wurden mit der 100 m-Mächtigkeitskontour geschnitten und die gering mächtigeren Teile gelöscht (Tabelle 13, 3j). Eine Kopie der Konturlinie wurde auf das DGM_grob_-1500 m projiziert (*Project_on surface*) und aus dieser und der ursprünglichen Konturlinie eine neue vertikale Wand erstellt (Tabelle 13, 3k) und der verbleibenden Fläche zugefügt (Tabelle 13, 3l).

In Fällen, in denen die Zechsteinbasis höher als 1500 m u. GOK liegt, wurde die Mächtigkeitsberechnung zur Zechsteinbasis statt zum DGM_grob_-1500 m gerechnet, weshalb eine neue Fläche aus DGM_grob_-1500 m und der Zechsteinbasis für die Mächtigkeitsberechnung erzeugt wurde (Tabelle 13, 2h).

Zu vermerken ist hierbei, dass im Falle von Überhängen und weiteren Unterschreitungen der 100 m Mindestmächtigkeiten, die in Hüllflächen der Salzdiapire auftreten können, aus technischen Gründen keine weitere Bearbeitung dieser Gebiete erfolgte. Im nachfolgenden Prozess zur weiteren Einengung der Teilgebiete auf Standortregionen ist eine

Distanz zu den Flanken der Salzstöcke einzuhalten, sodass diese ungenügend mächtigen Bereiche nicht weiter betrachtet werden.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Als maximale Suchteufe wurden 1500 m festgelegt (BGE 2020m). Als Salzschwebe wurden 300 m oberhalb des potentiellen ewG gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG berücksichtigt.

- Technische Umsetzung

Um die Zusatzanforderung „300 m Salzschwebe“ zu erfüllen wurden die in den Ausgangsmodellen vorhandenen Dachflächen der Salzstrukturen kopiert und um 300 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 13, 3a).

Das Digitale Geländemodell (DGM) für Niedersachsen, Bremen und Hamburg wurden eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe verschoben (*Compute_On Object*: z.B. Z = Z-300; Tabelle 13, 3b). Das DGM_grob_-300 m schnitt folgerichtig nach Anwendung des Kriteriums der Salzschwebe (vgl. Kapitel 3.1 in der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) keine Salzstruktur und wurde daher nicht weiterbearbeitet (Tabelle 13, 3c). Das DGM_grob_-1500 m wurde zusammengefügt, und an eine Auflösung von einer Kantenlänge von etwa 250 m angepasst und die Fläche außerhalb des Bearbeitungsbereich abgeschnitten.

Mit diesem DGM_grob_-1500 m wurden die verbleibenden Hüllflächen der Salzstrukturen verschnitten und alle Teile unterhalb von 1500 m u. GOK gelöscht (Tabelle 13, 3d). Im südlichen Niedersachsen treten einige Salzdiapire auf, bei welchen die Zechsteinbasis höher als 1500 m u. GOK liegt. In diesen Fällen wurde nicht mit dem DGM_grob_-1500 m verschnitten, sondern mit der Zechsteinbasis.

Einige Salzdiapire des GTA 3D-Modells bestehen aus senkrechten Salzstockwänden und einer dazugehörigen Dachfläche. In diesen Fällen, wurden die Wandflächen gleichermaßen um 300 m in die Tiefe versetzt und mussten nicht verschnitten werden (Tabelle 13, 3e).

Bei Salzdiapiren, deren Wände nicht senkrecht stehen, wurde mit der abgesenkten Dachfläche ein Duplikat der Salzstrukturwand (aus dem Ausgangsmodell), die in unveränderte Tiefe blieb, geschnitten (Tabelle 13, 3f). Der obere Teil der Salzstrukturflanke wurde gelöscht (*Part_Delete Selection*). Um eine neue Topfläche zu erzeugen wurde aus dem Flankenbereich eine Kurve erzeugt (*New Curve_From Surface Borders_One*) mit der die vergrößerte und 300 m tiefer versetzte Topfläche in z-Richtung geschnitten wurde (*Surface_Cut_By Curve*). Der überschüssige äußere Teil wurde gelöscht (Tabelle 13, 3g).

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Salz in steiler Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Automatisiert können Flächen mit geringerer Ausbreitung bei der folgenden länderübergreifenden Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG gelöscht werden.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher vorerst als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Niedersachsen, Bremen und Hamburg können Gebiete ausgewiesen werden, in denen Steinsalz in steiler Lagerung alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10).

Ergebnis

Durch die Modellierung der Salzstrukturen Niedersachsens, Bremens und Hamburgs konnten 127 Gebiete ermittelt werden, welche die Mindestanforderungen erfüllen und wurden als MG_d_z_alle in EPOS gespeichert (Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10). Sie sind mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit sowie minimaler und maximaler Tiefenlage in Tabelle 14 genannt. Die Gebiete erstrecken sich über sämtliche relevante Teufenbereiche von 300 m u. GOK bis 1500 m u. GOK.

Die Lage und Mächtigkeit der Strukturen ist Tabelle 14 zu entnehmen. Die maximale vertikale Mächtigkeit und Tiefenlage wurden durch SKUA-GOCAD™ errechnet.

Die nördlichen Gebiete Niedersachsens, sowie alle Gebiete Hamburgs liegen im Bereich von strukturbildendem Oberrotliegend-Salinar (Reinhold et al. 2008) und zählen gemäß Pollok et al. (2016) zu den Doppelsalinaren (Oberrotliegend- und Zechstein-Folge). Diese Gebiete erhielten den Präfix „MG_d_z-ro“. Die Gebiete mit dem Präfix „MG_d_z_“ bestehen nur aus Zechstein-Salinar.

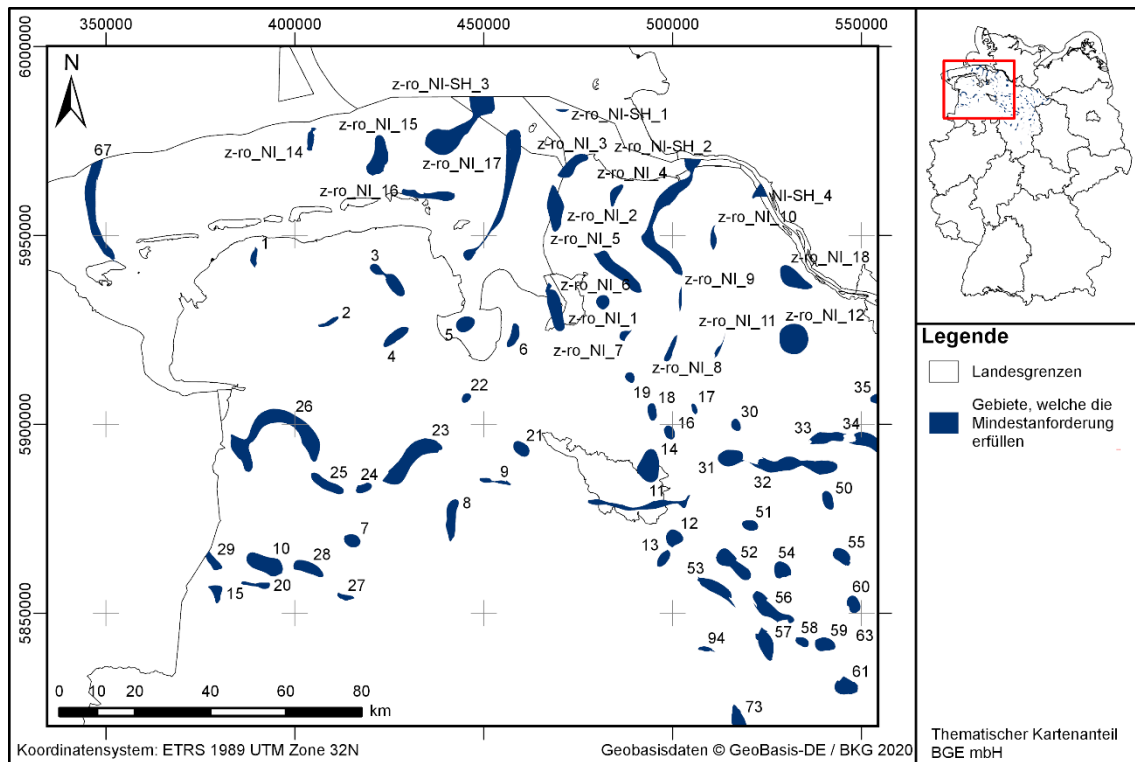


Abbildung 8: Überblick über den nordwestlichen Teil des Modellierergebnis.
 Die Benennungen der Gebiete (abgebildet ohne „MG_d_“), welche die Mindestanforderungen erfüllen, ist Tabelle 14 zu entnehmen. Gebiet mit dem Präfix „MG_d_z_NI_“ sind nur mit der letztgenannten Nummer dargestellt.

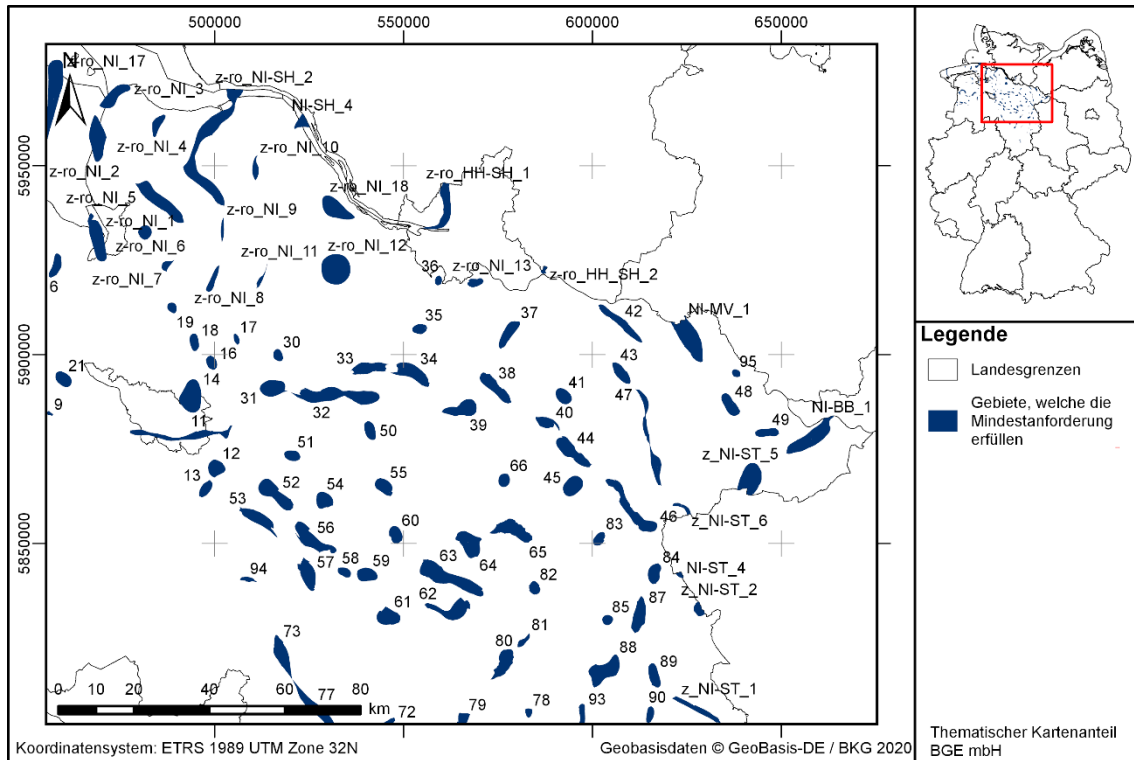


Abbildung 9: Überblick über den nordöstlichen Teil des Modellierergebnis. Die Benennungen der Gebiete (abgebildet ohne „MG_d_“), welche die Mindestanforderungen erfüllen, ist Tabelle 14 zu entnehmen. Gebiet mit dem Präfix „MG_d_z_NI_“ sind nur mit der letztgenannten Nummer dargestellt.

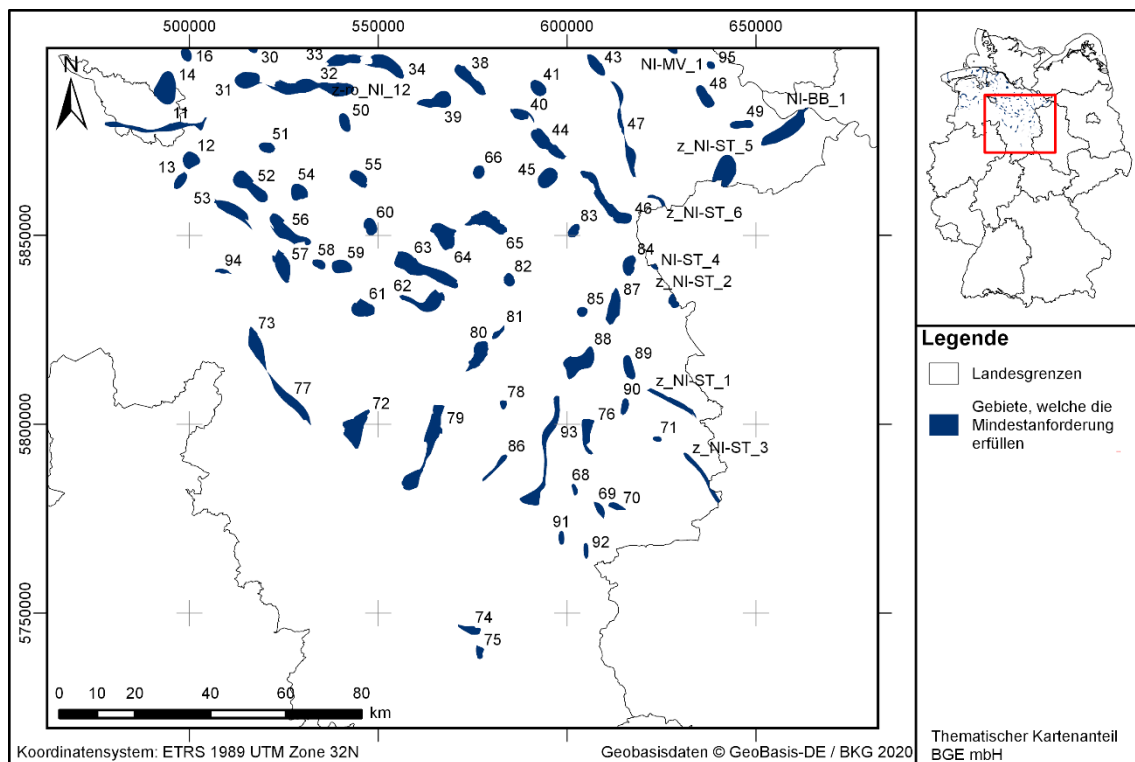


Abbildung 10: Überblick über den südlichen Teil des Modellierergebnis. Die Benennungen der Gebiete (abgebildet ohne „MG_d_“), welche die Mindestanforderungen erfüllen, ist Tabelle 14 zu entnehmen. Gebiet mit dem Präfix „MG_d_z_NI_“ sind nur mit der letztgenannten Nummer dargestellt.

Tabelle 14: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzscheibe)

ID-Mindestanforderungs- gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_NI_1	Westdorf	450	1040	1500
MG_d_z_NI_2	Brockzetel	250	1250	1500
MG_d_z_NI_3	Berdum-Jever	400	1120	1500
MG_d_z_NI_4	Etzel	600	910	1500
MG_d_z_NI_5	Arrngast	300	1210	1500
MG_d_z_NI_6	Seefeld	450	1060	1500
MG_d_z_NI_7	Gehlenberg	1170	330	1500
MG_d_z_NI_8	Sagermeer	1240	260	1500
MG_d_z_NI_9	Oldenburg-Süd	720	780	1500
MG_d_z_NI_10	Wahn	940	560	1500
MG_d_z_NI_11	Arsten-Osterholz	910	590	1500

ID-Mindestanforderungs- gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_NI_12	Thedinghausen	920	580	1500
MG_d_z_NI_13	Emtinghausen	870	630	1500
MG_d_z_NI_14	Lilienthal	1100	400	1500
MG_d_z_NI_15	Oberlanger Tenge	1050	450	1500
MG_d_z_NI_16	Adolphsdorf	660	840	1500
MG_d_z_NI_17	Breddorf	260	1240	1500
MG_d_z_NI_18	Teufelsmoor	550	950	1500
MG_d_z_NI_19	Oldendorf II	340	1160	1500
MG_d_z_NI_20	Lathen	1000	500	1500
MG_d_z_NI_21	Neuenhuntrorf	820	680	1500
MG_d_z_NI_22	Jaderberg	290	1210	1500
MG_d_z_NI_23	Zwischenahn	910	590	1500
MG_d_z_NI_24	Kamperfehn	790	710	1500
MG_d_z_NI_25	Scharrel	430	1070	1500
MG_d_z_NI_26	Bunde-Jemgum- Leer-Rhaude	1120	380	1500
MG_d_z_NI_27	Liener-Garen	760	740	1500
MG_d_z_NI_28	Börger	670	830	1500
MG_d_z_NI_29	Neusustrum	1110	390	1500
MG_d_z_NI_30	Brümmerhof	890	600	1500
MG_d_z_NI_31	Taaken	970	530	1500
MG_d_z_NI_32	Scheeßel/ Ostervesede	860	640	1500
MG_d_z_NI_33	Stemmen	810	690	1500
MG_d_z_NI_34	Otter-Todtshorn	630	870	1500
MG_d_z_NI_35	Sprötze	1030	470	1500
MG_d_z_NI_36	Sottorf	830	670	1500
MG_d_z_NI_37	Bahlburg	860	640	1500
MG_d_z_NI_38	Egestorf-Soderstorf	710	790	1500
MG_d_z_NI_39	Volkwardingen	1050	450	1500
MG_d_z_NI_40	Wettenbostel	490	1020	1500

ID-Mindestanforderungs- gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_NI_41	Kolkhagen	1180	310	1500
MG_d_z_NI_42	Rosenthal	460	1040	1500
MG_d_z_NI_43	Horndorf	750	750	1500
MG_d_z_NI_44	Ebstorf	780	720	1500
MG_d_z_NI_45	Bahnsen	1120	370	1500
MG_d_z_NI_46	Niendorf II/ Wieren/ Bodenteich	920	580	1500
MG_d_z_NI_47	Rosche-Thondorf	890	600	1500
MG_d_z_NI_48	Dannenberg	1150	350	1500
MG_d_z_NI_49	Gr. Heide-Siemen	1140	360	1500
MG_d_z_NI_50	Söhlingen	1020	480	1500
MG_d_z_NI_51	Wedehof	1180	320	1500
MG_d_z_NI_52	Verden	1010	490	1500
MG_d_z_NI_53	Eitzendorf	1080	420	1500
MG_d_z_NI_54	Hamwiede	1150	360	1500
MG_d_z_NI_55	Bommelsen	1110	390	1500
MG_d_z_NI_56	Rethem	1190	310	1500
MG_d_z_NI_57	Lichtenhorst	1090	410	1500
MG_d_z_NI_58	Eilte	1100	400	1500
MG_d_z_NI_59	Grethem-Büchten	1130	370	1500
MG_d_z_NI_60	Böstlingen	940	560	1500
MG_d_z_NI_61	Hope	1170	330	1500
MG_d_z_NI_62	Wietze-Hambühren	1180	320	1500
MG_d_z_NI_63	Meissendorf/ Wolthausen	1090	420	1500
MG_d_z_NI_64	Sülze	1070	430	1500
MG_d_z_NI_65	Weesen-Lutterloh	1070	430	1500
MG_d_z_NI_66	Dethlingen	1160	340	1500
MG_d_z_NI_67	Lisa	1020	480	1500
MG_d_z_NI_68	Thiede	1110	390	1500
MG_d_z_NI_69	Neindorf	1170	330	1500

ID-Mindestanforderungs- gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_NI_70	Asse	1240	320	1500
MG_d_z_NI_71	Beienrode	1000	500	1500
MG_d_z_NI_72	Benthe	1170	330	1500
MG_d_z_NI_73	Schessinghausen/ Husum	1070	430	1500
MG_d_z_NI_74	Harriehausen	1030	470	1500
MG_d_z_NI_75	Düderode-Olden- rode	940	560	1500
MG_d_z_NI_76	Bechtsbüttel	1150	350	1500
MG_d_z_NI_77	Bokeloh	1140	360	1500
MG_d_z_NI_78	Berkhöpen	1190	310	1500
MG_d_z_NI_79	Sarstedt/Sehnde	1250	260	1500
MG_d_z_NI_80	Wathlingen- Hänigsen	1170	330	1500
MG_d_z_NI_81	Wienhausen	1170	340	1500
MG_d_z_NI_82	Höfer	1090	410	1500
MG_d_z_NI_83	Bokel	1100	400	1500
MG_d_z_NI_84	Wittingen	920	580	1500
MG_d_z_NI_85	Wesendorf	820	680	1500
MG_d_z_NI_86	Mölme / Gr. Ilsede	1120	380	1500
MG_d_z_NI_87	Vorhop	970	530	1500
MG_d_z_NI_88	Gifhorn	1020	480	1500
MG_d_z_NI_89	Weyhausen	1030	470	1500
MG_d_z_NI_90	Ehmen	1240	270	1500
MG_d_z_NI_91	Flachstöckheim	950	550	1500
MG_d_z_NI_92	Werla-Burgdorf	1140	360	1500
MG_d_z_NI_93	Broistedt/Vechelde/ Wendeburg/ Rolfsbüttel	1180	320	1500
MG_d_z_NI_94	Blenhorst	1090	410	1500
MG_d_z_NI_95	Kaarßen	490	1020	1500
MG_d_z-ro_NI_1	Dedesdorf	800	720	1500

ID-Mindestanforderungs- gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z-ro_NI_2	Spieka	500	1000	1500
MG_d_z-ro_NI_3	Cuxhaven	200	1300	1500
MG_d_z-ro_NI_4	Altenbruch	200	1280	1500
MG_d_z-ro_NI_5	Alfstedt	750	730	1500
MG_d_z-ro_NI_6	Bramel	1150	340	1500
MG_d_z-ro_NI_7	Beverstedt	340	1160	1500
MG_d_z-ro_NI_8	Basdahl	300	1190	1500
MG_d_z-ro_NI_9	Armstorf	250	1230	1500
MG_d_z-ro_NI_10	Krautsand	350	1170	1500
MG_d_z-ro_NI_11	Bevern	250	1250	1500
MG_d_z-ro_NI_12	Harsefeld	1140	360	1500
MG_d_z-ro_NI_13	Meckelfeld	730	760	1500
MG_d_z-ro_NI_14	Mira	340	1160	1500
MG_d_z-ro_NI_15	Harle Riff	660	840	1500
MG_d_z-ro_NI_16	Wangerooge	490	1010	1500
MG_d_z-ro_NI_17	Mellum/Eversand/ Scharhörn	1180	320	1500
MG_d_z-ro_NI_18	Stade	1200	300	1500
MG_d_z-ro_NI-SH_1	Oldenswort Süd	1100	420	1500
MG_d_z-ro_NI-SH_2	Osterbruch/Odis- heim/ Armstorf	700	800	1500
MG_d_z-ro_NI-SH_3	Roter Sand/ Feuerschiff Elbe	1030	470	1500
MG_d_z-ro_NI-SH_4	Hamelwörden	290	1210	1500
MG_d_z-ro_HH-SH_1	Langenfelde/ Schnelsen	420	480	1500
MG_d_z-ro_HH-SH_2	Geesthacht	700	800	1500
MG_d_z_NI-BB_1	Gorleben	1030	470	1500
MG_d_z_NI-MV_1	Kl. Kühren - Gülze- Sumte	920	590	1500
MG_d_z_NI-ST_1	Allertal	530	580	1440
MG_d_z_NI-ST_2	Nettgau	880	630	1500

ID-Mindestanforderungs- gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_NI-ST_3	Offlebener Sattel	1200	300	1500
MG_d_z_NI-ST_4	Waddekath	780	730	1500
MG_d_z_NI-ST_5	Wustrow I	1040	460	1500
MG_d_z_NI-ST_6	Varbitz	670	840	1500

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 15 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 15: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Beschreibung
11842295	7775		Geotektonischer Atlas 3D	3D-Modell (Bombien et al. 2012)
11842726	7632		Strukturumrisse_500m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7633		Strukturumrisse_1000m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7634		Strukturumrisse_1500m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7635		Strukturumrisse_2000m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)

1.1.4 Sachsen-Anhalt

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23°StandAG für Steinsalz in steiler Lagerung in den Einheiten Zechstein und Oberrotliegend, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten können. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Sachsen-Anhalt (ST). Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 BGE 2020j) die salinaren Gesteinsabfolgen des Oberrotliegend und Zechstein in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Niveauschnitte) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Sachsen-Anhalt, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in BGE (2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Im Untergrund Norddeutschlands existieren über 400 Salzdiapire (Salzstöcke und Salzmauern), die innerhalb des Norddeutschen Beckens (NDB) liegen. Die Salzdiapire werden aus salinaren Ablagerungen des Zechstein sowie in einigen Bereichen zusätzlich von Salinargesteinen des Oberrotliegend aufgebaut (Pollok et al. 2016).

Das Ende der variszischen Gebirgsbildung, im späten Karbon, markiert weltweit eine geologische Zeitwende, so dass während des Perm (296–251 Millionen Jahren) nahezu alle kontinentalen Platten (u. a. Gondwana und Laurasia) im Superkontinent Pangäa vereint waren (Meschede 2018). Im Zuge der weiteren geologischen Entwicklung in Mitteleuropa fand im frühen Perm der Übergang von einem kompressiven zu einem extensiven tektonischen Regime statt. Als Resultat der Krustendehnung und der darauffolgenden thermischen Beckensubsidenz im mittleren Perm bildeten sich innerhalb des Superkontinents Pangäa typische intrakontinentale Beckensysteme, wie z. B. das Zentraleuropäische Becken (Meschede 2018). Das Norddeutsche Becken gehört als Teil des südlichen Permbeckens dem intrakontinentalen Zentraleuropäischen Beckensystem an (Maystrenko et al. 2008).

Durch eine rasche marine Flutung des intrakontinentalen Rotliegend-Beckens entwickelte sich das oberpermische marin geprägte Zechsteinbecken. Je nach Beckenposition entstanden durch zyklische Eindunstung von Meerwasser bis zu sieben Zechstein-Salinarformationen im Zentrum und vier bis fünf an den Beckenrändern des NDB (Käding

2005a; Käding 2005b). Ein vollständiger mariner Salinarzyklus beginnt idealerweise mit tonigen Sedimenten, mit darauffolgenden karbonatischen (Kalkstein), sulfatischen (Gips und Anhydrit) und abschließend chloridischen Ablagerungen (Stein- und Kalisalze), die entsprechend ihrer stoffspezifischen Wasserlöslichkeit ausfallen („Eindampfungsabfolge“ (z. B. Warren 2015)). Die mächtigsten Steinsalzablagerungen finden sich in dem sogenannten Staßfurt-Steinsalz (z2-Hauptsalz) im Staßfurt-Zyklus (z2), aus dem auch der Hauptanteil des Salzes in den Zechsteinsalzstöcken stammt (Frisch & Kockel 2004). Ursprüngliche Mächtigkeiten des gesamten Zechstein werden mit bis zu 1500 m im zentralen Beckenbereich rekonstruiert (Baldschuhn et al. 2001; Scheck-Wenderoth et al. 2008). Die Zechstein-Mächtigkeit durch Salzakkumulation innerhalb von Salzdiapiren liegt in Norddeutschland bei ca. 4500 m (Baldschuhn et al. 2001). Die akkumulierte Mächtigkeit des Oberrotliegend- und Zechsteinsalinars innerhalb von Doppelsalinaren liegt bei über 7000 m (Baldschuhn et al. 2001).

Die Entwicklung von Salzstrukturen verläuft mehrphasig und beginnt mit stratiformen (flach lagernden) Salzschieben. Diese können zu plastischem Kriechen in Richtung der größten Druckentlastung angeregt werden und in ihrer Mächtigkeit zu sogenannten Salzkissen anschwellen. Die Genese der Salzstrukturen ist durch die Ausprägung der Randsenken ersichtlich, falls diese nicht erodiert wurden (Trusheim 1960). Bei fortschreitender Salzakkumulation ist das Deckgebirge durch Dehnung und Erosion beansprucht und der Salzzustrom kann entlang von Schwächezonen aufsteigen (Hudec & Jackson 2007). Das diapirisch durchgebrochene Salz intrudiert in die mesozoisch-känozoischen Sedimente und bildet Salzstöcke oder langgestreckte Salzmauern aus (Frisch & Kockel 2004). Für den weiteren Aufstieg des Salzdiapirs muss die Aufstiegs geschwindigkeit des Salzes größer als die Sedimentationsrate der Deckgebirgsschichten sowie die Ablagerungsrate im Dachbereich sein (Hudec & Jackson 2007). Das Ende der Phase des „aktiven Diapirismus“ wird zeitlich belegt durch das Vorhandensein von Deckgebirgsschichten, die den Salzdiapir vollständig und mit gleicher Mächtigkeit überdecken. Bei erneutem Salzzustrom („Nachschubstadium“) wird das Deckgebirge aufgewölbt, was mit der Bildung von Scheitelstörungen einhergehen kann (Frisch & Kockel 2004). Die diapirische Phase endet, wenn die mobilen Steinsalzvorkommen in den Kissenfüßen aufgebraucht sind. Durch Ablagerung der löslichen Bestandteile im Dachbereich von Salzstrukturen wird das Hutgestein aus den unlöslichen Rückständen gebildet.

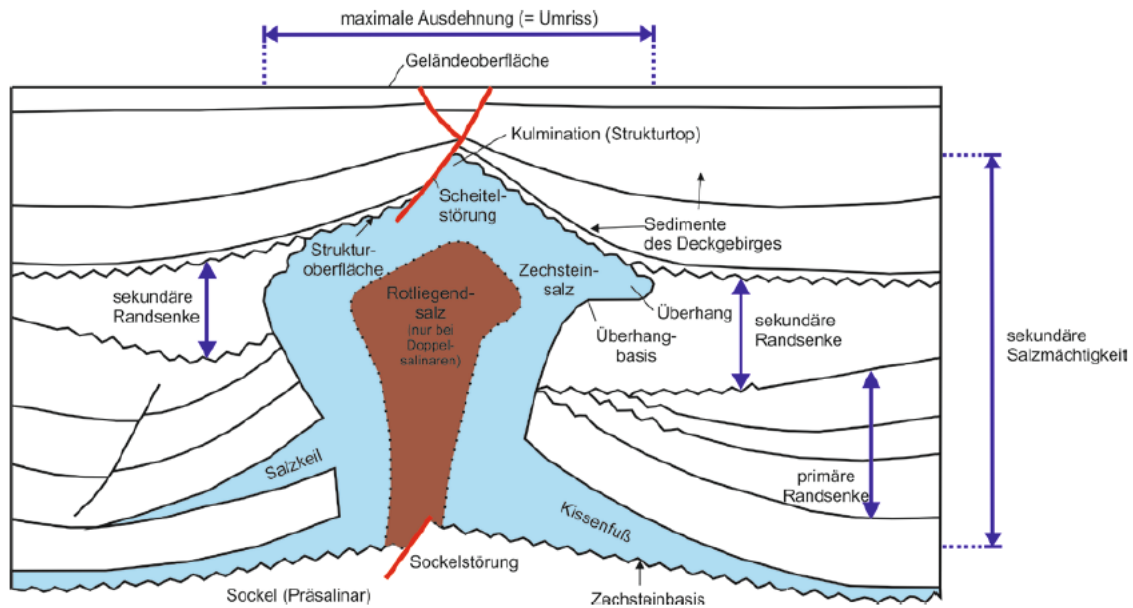


Abbildung 11: Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)

Das NDB ist charakterisiert durch einen tektonischen Stockwerksbau mit Bruchschollentektonik im subsalinaren Sockel und einem komplex strukturiertem Deckgebirge mit Salzstrukturen, die mechanisch durch das Zechstein-Salinar entkoppelt sind (Kockel 1999). Die Beckenentwicklung ist daher eng mit der Genese der Salzstrukturen verknüpft. Abhängig von der Beckenposition und dem regionaltektonischen Umfeld weisen die norddeutschen Salzstrukturen eine zeitlich und räumlich sehr variable Entwicklungsgeschichte auf (Kockel 1998). Sie unterscheiden sich zusätzlich durch ihre äußere Form und den Internbau. Die Hauptphasen der Diapirbildung erfolgten im Keuper und im Mitteljura bis zur Unterkreide (Scheck-Wenderoth et al. 2008). Während der Oberkreide änderte sich das Spannungsregime in eine Nordnordost-Südsüdwest gerichtete Einengung, die die Salzdiapirbildung vor allem in den herzynischen streichenden Sockelstörungen vorantrieb (Baldschuhn et al. 2001). Der mehrphasige Salzaufstieg und die unterschiedlichen lithologischen Zusammensetzungen führen zu einem komplexen Internbau mit intensiver Faltentektonik (de Boer 1971). Dennoch weisen die meisten Zechstein-Diapire eine Zweiteilung auf: einen Kern aus weitestgehend homogenem Steinsalz der Staßfurt-Formation und jüngere, weniger mobile Salinargesteine der jüngeren Zyklen, die durch höhere Anhydritanteile charakterisiert sind (Pollok et al. 2016).

Eingangsdaten

Alle Eingangsdaten(-sätze) sind in Tabelle 16 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 16: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname
1	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturumrisse_500m (von Goerne et al. 2016)
2	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturumrisse_1000m (von Goerne et al. 2016)
3	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturumrisse_1500m (von Goerne et al. 2016)
4	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturumrisse_2000m (von Goerne et al. 2016)
5	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM200
6	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)
7	DE	BGR		pdf	InSpEE-Bericht, Anhang 3-1, 3-2 (von Goerne et al. 2016)
8	DE	BGR	11842726/7616	shp	Zechstein_contour (220_z_iso), SPBA (Doornenbal & Stevenson 2010)
9	DE	BGE	11902999/9870	ts	SPBA in 3D umgesetzt

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Sachsen-Anhalt hat kein geologisches 3D-Modell an die BGE übergeben. Daher wurden die Salzstrukturen von der BGE erstellt. Basierend auf Salzstrukturschnitten und Kulminationspunkten des InSpEE-Berichts (Pollok et al. 2016; Gast & Riesenberg 2016; von Goerne et al. 2016) wurden Salzstrukturen (ausschließlich Salzdiapire) modelliert.

Die Eingangsdaten aus dem InSpEE-Bericht sind nicht länderbezogen, sondern für ganz Norddeutschland verfügbar. Es wurden daher Salzstrukturen mit modelliert, die z. T. auch innerhalb des Landesgebietes von Brandenburg und Niedersachsen liegen. Diese Strukturen wurden nachfolgend an der Landesgrenze geschnitten und ausschließlich auf Bereiche innerhalb Sachsen-Anhalts reduziert.

Die Strukturumrisse der Salzdiapire, die im Rahmen des InSpEE-Projektes entstanden und die in Sachsen-Anhalt liegen, wurden in ArcGIS Pro markiert und die vier Niveaus (500 m u. NN, 1000 m u. NN, 1500 m u. NN und 2000 m u. NN) als Shape-Dateien exportiert (Tabelle 17). Über Import von *Cultural Data* wurden diese Niveauschnitte in SKUA-GOCAD importiert, die bei diesem Schritt als Kurven eingeladen wurden und in die entsprechende Tiefe verschoben (vgl. Abbildung 12). Diese Kurven wurden dann zu jeweils einem Teil (*part*) zusammengefügt (*merge*). Im Falle von Salzdiapiren mit mehreren Kulminationspunkten wurde die Trennungslinie zwischen den Strukturen entfernt.

Aus der Liste aller untersuchten Salzstrukturen im Norddeutschen Becken des InSpEE-Projekts (von Goerne et al. 2016) wurde der Strukturtop (Kulminationspunkt) in m u. NN des jeweiligen Salzdiapirs entnommen und als Punkt in SKUA-GOCAD die angegebene Tiefe verschoben.



Abbildung 12: Ausschnitt der Datengrundlage für die Modellierung der Salzstrukturen im Norden von Sachsen-Anhalt. Niveauschnitte in 500 m u. NN (grau), 1000 m u. NN (blau), 1500 m u. NN (orange) und 2000 m u. NN (grün) sowie Kulminationspunkte lagen für die Bearbeitung vor. Die Landesgrenze ist in schwarz dargestellt und die Blickrichtung nach Norden.

Tabelle 17: Aufliste der Salzstrukturen, deren Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) sowie der Strukturtyp aus dem InSpEE-Bericht (von Goerne et al. 2016)

Anzahl der Salzstrukturen	Salzstruktur	Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) [m u. NN]	Strukturtyp
1	Allertal	0	Salzstock
2	Altmersleben	23	Salzstock
3	Apenburg	160	Salzstock
4	Arendsee	80	Salzstock
5	Ascherslebener Sattel	-115	Salzstock
6	Aulosen	816	Salzstock
7	Beesenlaublinger Gipsstock	0	Salzstock
8	Bergzow	200	Salzstock

Anzahl der Salzstrukturen	Salzstruktur	Strukturtop (Lage des Kulminationspunktes) [m u. NN]	Strukturtyp
9	Berkau	150	Salzstock
10	Bonese	400	Salzstock
11	Breitenrode	0	Salzstock
12	Colbitz	122	Salzstock
13	Dannefeld	170	Salzstock
14	Demsin	300	Salzstock
15	Egelner Sattel	0	Salzstock
16	Gr. Gerstedt	766	Salzstock
17	Gr. Schwechten	93	Salzstock
18	Jahrstedt	150	Salzstock
19	Lüge-Liesten	250	Salzstock
20	Mahlitz	0	Salzstock
21	Meseberg	0	Salzstock
22	Meßdorf	340	Salzstock
23	Mützel	384	Salzstock
24	Nettgau	196	Salzstock
25	Offlebener Sattel	-100	Salzstock
26	Oscherslebener Sattel	0	Salzstock
27	Peckensen	236	Salzstock
28	Poppau	450	Salzstock
29	Quedlinburger Sattel	1000	Salzstock
30	Ristedt	352	Salzstock
31	Staßfurter Sattel	0	Salzstock
32	Varbitz	500	Salzstock
33	Waddekath	300	Salzstock
34	Wittenberge	70	Salzstock
35	Wustrow I	150	Salzstock
36	Zobbenitz	200	Salzstock

Zwischen den Kurven der einzelnen Strukturen in den Tiefen 500 m u. NN bis 2000 m u. NN wurden Flächen über *New_From Curves_Several Curves* erzeugt. Bei einigen, komplexeren Salzstrukturen mussten Teile der Struktur separat modelliert werden und dafür die Niveauschnitte temporär getrennt werden. Die modellierten Flächen wurden den einzelnen Salzstrukturen zugeordnet. Für die Topfläche wurde eine Fläche innerhalb des höchsten Niveauschnitts erzeugt, *Constraints* auf die *Border* gesetzt, die keine Bewegung in allen Richtungen erlauben und der Kulminationspunkt als *Control Point* definiert. Die Triangulation der Fläche wurde erst auf Gleichschenkeligkeit der Vermaschung verbessert (*Beautify Triangles for Equilaterality*) und dann wurde die Fläche interpoliert (*Geometry_On Entire Surface*). Für Salzmauern wurde eine Kurve erzeugt, die auf eine Tiefe zwischen höchstem Niveauschnitt und Kulminationspunkt geschoben wurde und als weitere *Constraints* genutzt wurde. Die fertig modellierten Flächen der einzelnen Strukturen wurden als Strukturname mit dem Zusatz „ganz“ gespeichert.

Für Sachsen-Anhalt wurde im Rahmen der Standortauswahl auf Basis des 2D-Kartenwerkes des SPBA (Doornenbal & Stevenson 2010) ein rudimentäres 3D-Modell erstellt. Auf Basis von Isolinien wurden Hilfsflächen modelliert, deren Verschneidungen und Durchdringungen entfernt wurden. Aus diesen Hilfsflächen wurden elf Basisflächen modelliert. Störungen sind im Datensatz des SPBA als Linien ohne Teufenangaben ausgewiesen. Im SPBA-3D wurden diese Störungslinien auf die modellierten Flächen projiziert ohne die Basisflächen zu versetzen. Die Zechstein-Basisfläche des SPBA-3D wurde eingeladen. Die Salzstrukturen Sachsens-Anhalts wurden mit dieser Hilfsfläche verschnitten und Bereiche unterhalb gelöscht.

Die fertigen Flächen aller Salzdiapire wurden zu einem Datensatz zusammengefügt und als *ST_z_d.ts* gespeichert (Abbildung 13) sowie alle Topflächen zu einem Datensatz (*ST_z_d_Top.ts*) vereint.

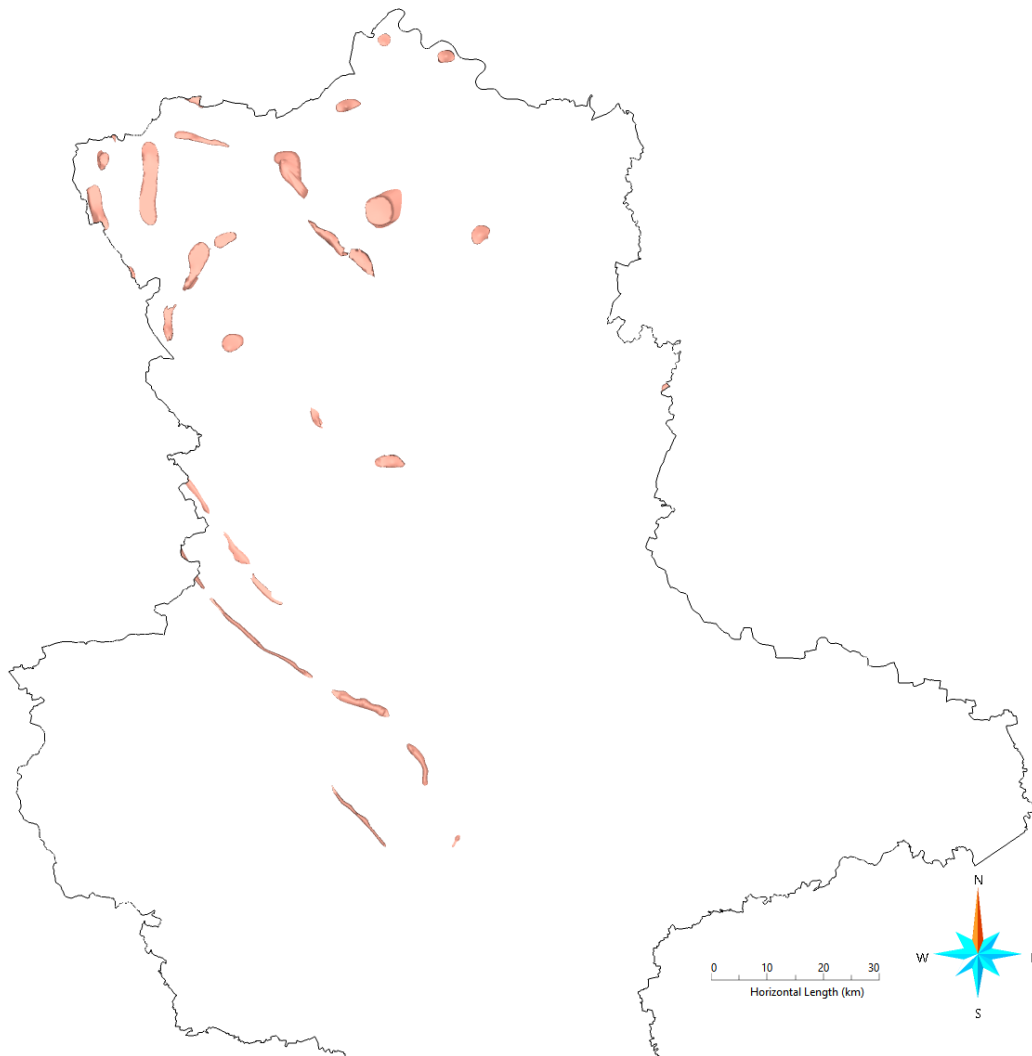


Abbildung 13: Überblick über die modellierten Salzstrukturen in Sachsen-Anhalt und angrenzenden Bundesländern.
 In schwarz ist die Landesgrenze von Sachsen-Anhalt dargestellt.

Tabelle 18: Vorgehensweise der Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Topflächen der Salzstrukturen kopieren und um 300 m absenken	ST_z_d_Top_-300.ts
b) DGM 2x kopieren und Kopie um 300 m und 1500 m absenken	DGM_-300m.ts, DGM_-1500m.ts
c) Topflächen aus a) mit DGM_-300m auf Tiefenlage prüfen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Hüllflächen der Salzstrukturen kopieren und mit DGM_-1500m verschneiden	ST_z_d_cut_DGM-1500.ts
e) Abgesenkte Topflächen aus a) mit ursprünglicher Hüllfläche aus d) verschneiden und umgekehrt	ST_z_d_cut_DGM-1500_mutualcut.ts, ST_z_d_Top_-300_mutualcut.ts
f) Ursprüngliches Top und abgesenkte Flanken löschen sowie eine neue Fläche aus abgesenkten Salzstrukturtops und originalen Flanken generieren	ST_z_d_bearb.ts
g) Zechsteinbasisfläche einladen und mit DGM_1500 zu einer Fläche vereinen	DGM_1500_Z_basis.ts
h) Distanz/Mächtigkeit zwischen Hüllfläche aus f) und DGM_-1500m bzw. Zechsteinbasis aus g) berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	ST_z_d_bearb_Thickness100m.ts
i) Neue Fläche aus h) erstellen und Attribut „Tiefenlage“ erzeugen	MG_d_z_ST_1.ts, MG_d_z_ST_2.ts, etc.
3. Export aller Gebiete aus i) als DXF-Datei für die Maximalausdehnungen und txt-Datei im ASCII-Format mit den Attributen „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“	MG_d_z_ST.dxf MG_d_z_ST.txt

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selbst sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993).

Da in allen ausgewiesenen Gebieten die lithostratigraphischen Einheiten z2NA (Staßfurt-Steinsalz), z3NA (Leine-Steinsalz) und/oder z4NA (Aller-Steinsalz) verbreitet sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als erfüllt angesehen. Der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, gibt für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ eine günstige Bewertung an. Diese ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger (BGE 2020b).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für Steinsalz in steiler Lagerung in den verbleibenden Gebieten in Sachsen-Anhalt **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Salinars wurde im dreidimensionalen Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die gesamte Salzstruktur zusammen (inklusive des Hutgesteins). Einige Salzstrukturen besitzen einen flach zulaufenden Überhang, auf den das 100 m-Kriterium aus technischer Machbarkeit nicht angewendet werden konnte. Dies ist jedoch zu vernachlässigen, da für die weitere Betrachtung der Teilgebiete die zentralen Bereiche bevorzugt werden, da dort ein allseitiger Umschließungsgrad gegeben ist und davon ausgegangen wird, dass im Zentrum eher geringere Vorkommen von nicht wirtsgesteinsrelevanten Salinargesteinen anzutreffen sind (Pollok et al. 2016).

- Technische Umsetzung

Als Untergrenze für die Berechnung der vertikalen Mächtigkeiten der Salzstrukturen funktionierte eine Kopie des DGM_-1500 m sowie für höher liegende Salzstrukturen, die Zechsteinbasis aus dem SPBA-3D, dafür wurden beide Flächen zu einer Fläche vereint (Tabelle 18, 2g). Mit der Funktion *Compute_Vertical Thickness* wurde die vorab angelegte Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Hüllflächen der Salzstrukturen berechnet (Tabelle 18, 2h). Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ der Salzstrukturen wurde für die Visualisierung ausgewählt und Konturlinien, die eine Mächtigkeit von 100 m anzeigen, eingeschaltet. Aus den 100-m-Konturlinien wurden Kurven erzeugt (*New Curve_From Contour Lines*). Es fiel nun auf, dass bei den vertikal-stehenden Flanken der Salzstrukturen die unteren 100 m zur Basisfläche als geringer 100 m angezeigt wurden, was als Artefakt angesehen werden muss. Strukturen deren Dachbereich sehr tief liegt und von der Konturlinie getroffen wurde, wurden mit dieser geschnitten (Tabelle 18, 2h).

In Fällen, in denen die Zechsteinbasis höher als 1500 m u. GOK liegt, wurde die Mächtigkeitsberechnung zur Zechsteinbasis statt zum DGM_-1500 m gerechnet, weshalb eine neue Fläche aus DGM_-1500 m und der Zechsteinbasis für die Mächtigkeitsberechnung erzeugt wurde (Tabelle 18, 2g).

Zu vermerken ist hierbei, dass im Falle von Überhängen und weiteren Unterschreitungen der 100 m Mindestmächtigkeiten, die in Hüllflächen der Salzdiapire auftreten können, aus technischen Gründen keine weitere Bearbeitung dieser Gebiete erfolgte. Im nachfolgenden Prozess zur weiteren Einengung der Teilgebiete auf Standortregionen ist eine Distanz zu den Flanken der Salzstöcke einzuhalten, sodass diese ungenügend mächtigen Bereiche nicht weiter betrachtet werden.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Als maximale Suchteufe wurden 1500 m festgelegt (BGE 2020m). Als Salzscheibe wurden 300 m oberhalb des potentiellen ewG gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG berücksichtigt.

- Technische Umsetzung

Um das Zusatzkriterium „300 m Salzschwebe“ zu erfüllen wurden die Topflächen der Salzstrukturen kopiert und um 300 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 18, 2a). Die Hüllflächen der gesamten Salzstrukturen wurden mit den abgesenkten Topflächen verschnitten (*mutual cut*) und die überschüssigen Flächenbereiche gelöscht (Tabelle 18, 2e).

Für Salzstrukturen mit komplizierten Geometrien musste ein gesondertes Vorgehen gewählt werden. Auf Basis des breitesten und höchsten Niveauschnittes der Originalfläche wurde eine Fläche erzeugt, die erweitert und um 300 m in die Tiefe versetzt wurde. Mit dieser Fläche wurde dann die Salzstruktur geschnitten und der obere Teil gelöscht. Die Original-Topfläche wurde kopiert und 300 m in die Tiefe verschoben. Mit einem *mutual cut* zwischen beiden Topflächen sowie der Kurve der oberen *Border* der Strukturflanken entstand eine zusammengesetzte, neue Topfläche.

Das Digitale Geländemodell (DGM) für Sachsen-Anhalt wurde eingeladen, zweimal kopiert und um 300 m und 1500 m in die Tiefe verschoben (*Compute_On Object: z.B. Z = Z-1500;*). Mit dem DGM_-300m wurde die Tiefenlage kontrolliert (Tabelle 18, 2c). Die Hüllflächen wurde mit dem DGM_-1500 m verschnitten (Tabelle 18 2d). Die Flächen unterhalb 1500 m u. GOK wurden entfernt. Als Attribut wurde „Tiefenlage“ hinzugefügt, die die Tiefenlage unterhalb der Geländeoberkante visualisiert (Tabelle 18, 2i). In Teilen Sachsens-Anhalts treten Salzdiapire auf, bei welchen die Zechsteinbasis höher als 1500 m u. GOK liegt. In diesen Fällen wurde nicht mit dem DGM_-1500 m verschnitten, sondern mit der Zechsteinbasis.

Für alle verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einflusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Steinsalz in steiler Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Automatisiert können Flächen mit geringerer Ausbreitung in der länderübergreifenden Bearbeitung gelöscht werden.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher vorerst als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Sachsen-Anhalt können Gebiete ausgewiesen werden, in denen Steinsalz in steiler Lagerung alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 14).

Ergebnis

Durch die Bearbeitung und schrittweisen Anwendung der Mindestanforderungen ergaben sich 30 Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (Abbildung 14). Die Gebiete wurden unter MG_d_z_ST gespeichert und sind in

Tabelle 19 mit der ID, dem Strukturnamen, der maximalen Mächtigkeit sowie der minimalen und maximalen Tiefe unter der Geländeoberkante aufgelistet. Die Salzstrukturen, die über die Landesgrenze von Sachsen-Anhalt hinausreichen, wurden an der Landesgrenze geschnitten und wurden mit dem jeweiligen Landeskürzel versehen (z. B. MG_d_z_ST_NI_2).

Die maximalen Mächtigkeiten der Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, liegen zwischen 260 m und 1150 m. Die geringste minimale Tiefe liegt bei 320 m und die maximale Tiefenlage wurde durch das Tiefenkriterium auf maximal 1500 m u. GOK beschränkt.

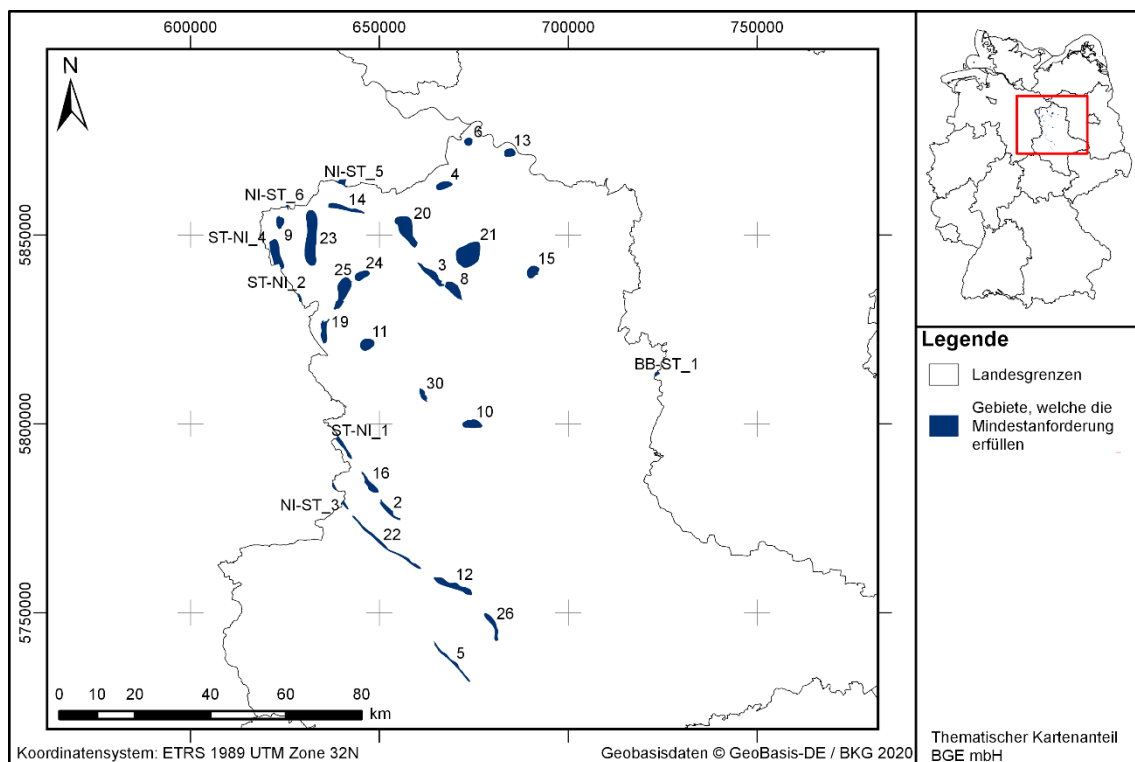


Abbildung 14: Überblick über die Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen auf Basis der Salzstrukturen in Sachsen-Anhalt. Gebiete, die nur mit Nummern bezeichnet sind, haben den Präfix MG_d_z_ST_, während die randlichen Gebiete den Präfix MG_d_z_ besitzen und z. T. in Niedersachsen bzw. Brandenburg liegen

Tabelle 19: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzschwebe)

ID-Mindestanforderungsgebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_ST_2	Allertal (Ost)	360	710	1180
MG_d_z_ST_3	Altmersleben	1100	400	1500
MG_d_z_ST_4	Arendsee	1120	380	1500
MG_d_z_ST_5	Ascherslebener Sattel	850	320	1500
MG_d_z_ST_6	Aulosen	370	1130	1500
MG_d_z_ST_8	Berkau	1010	490	1500
MG_d_z_ST_9	Bonese	720	780	1500
MG_d_z_ST_10	Colbitz	570	500	1120
MG_d_z_ST_11	Dannefeld	530	530	1060
MG_d_z_ST_12	Egelner Sattel	1010	490	1070
MG_d_z_ST_13	Wittenberge	1110	390	1500
MG_d_z_ST_14	Gr. Gerstedt	400	1100	1500
MG_d_z_ST_15	Gr. Schwechten	1060	440	1500
MG_d_z_ST_16	Allertal (Mitte)	380	640	1160
MG_d_z_ST_19	Jahrstedt	990	510	1500
MG_d_z_ST_20	Lüge-Liesten	840	660	1500
MG_d_z_ST_21	Meßdorf	820	680	1500
MG_d_z_ST_22	Oscherslebener Sattel	1090	410	1500
MG_d_z_ST_23	Peckensen	910	590	1500
MG_d_z_ST_24	Poppau	690	810	1500
MG_d_z_ST_25	Ristedt	800	700	1500
MG_d_z_ST_26	Steißfurter Sattel	850	380	1100
MG_d_z_ST_30	Zobbenitz	580	570	1070
MG_d_z_ST_NI_1	Allertal (West)	400	440	930
MG_d_z_ST_NI_2	Nettgau	930	570	1500
MG_d_z_ST_NI_3	Offlebener Sattel	1140	360	1500
MG_d_z_ST_NI_4	Waddekath	980	520	1500

ID-Mindestanfor- derungsgebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z_ST_NI_5	Wustrow I	790	710	1500
MG_d_z_ST_NI_6	Varbitz	260	1240	1500
MG_d_z_ST_BB_1	Demsin	790	710	1500

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 20 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 20: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei- ID	Dateiname	Beschreibung
11842726	7632		Strukturumrisse_500m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7633		Strukturumrisse_1000m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7634		Strukturumrisse_1500m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7635		Strukturumrisse_2000m	Niveauschnitt InSpEE (von Goerne et al. 2016)
11842726	7616		Zechstein_contour (220_z_iso)	SPBA (Doornenbal & Stevenson 2010)
11902999	9870		ST_SKUA_Export (ST_220_z_iso_rev01)	SPBA in 3D umgesetzt

1.1.5 Schleswig-Holstein

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23°StandAG für Steinsalz in steiler Lagerung in den Einheiten Zechstein und Oberrotliegend, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten können. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Schleswig-Holstein (SH). Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 BGE 2020j) die salinaren Gesteinsabfolgen des Oberrotliegend und Zechstein in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Niveauschnitte) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Schleswig-Holstein, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in BGE (2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Im Untergrund Norddeutschlands existieren über 400 Salzdiapire (Salzstöcke und Salzmauern), die innerhalb des Norddeutschen Beckens (NDB) liegen. Die Salzdiapire werden aus salinaren Ablagerungen des Zechstein sowie in einigen Bereichen zusätzlich von Salinargesteinen des Oberrotliegend aufgebaut (Pollok et al. 2016).

Das Ende der variszischen Gebirgsbildung, im späten Karbon, markiert weltweit eine geologische Zeitwende, so dass während des Perm (296–251 Millionen Jahren) nahezu alle kontinentalen Platten (u. a. Gondwana und Laurasia) im Superkontinent Pangäa vereint waren (Meschede 2018). Im Zuge der weiteren geologischen Entwicklung in Mitteleuropa fand im frühen Perm der Übergang von einem kompressiven zu einem extensiven tektonischen Regime statt. Als Resultat der Krustendehnung und der darauffolgenden thermischen Beckensubsidenz im mittleren Perm bildeten sich innerhalb des Superkontinents Pangäa typische intrakontinentale Beckensysteme, wie z. B. das Zentraleuropäische Becken (Meschede 2018). Das Norddeutsche Becken gehört als Teil des südlichen Permbeckens dem intrakontinentalen Zentraleuropäischen Beckensystem an (Maystrenko et al. 2008).

Während des Oberrotliegend in der Havel- und Elbe-Subgruppe entstanden im zentralen Teil des südlichen Permbeckens durch zyklische Eindunstung (Evaporation) eines kontinentalen Salzsees Steinsalzlagen (mit geringmächtigen Anhydrit- und Kalklagen) im

Wechsel mit Ton- und Siltsteinen (u. a. Legler 2006). Während die salinaren Ablagerungen der Havel-Subgruppe nur auf kleine Gebiete im Beckenzentrum beschränkt sind, umspannt der Sedimentationsraum der Elbe-Subgruppe im Westen das zentrale Norddeutsche Becken im Bereich der heutigen Nordsee bis nach Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg im Süden und Osten (u. a. Plein & Van Adrichem Boogaert 1995).

Durch eine rasche marine Flutung des intrakontinentalen Rotliegend-Beckens entwickelte sich das oberpermische marin geprägte Zechsteinbecken. Je nach Beckenposition entstanden durch zyklische Eindunstung von Meerwasser bis zu sieben Zechstein-Salinarformationen im Zentrum und vier bis fünf an den Beckenrändern des NDB (Käding 2005a; Käding 2005b). Ein vollständiger mariner Salinarzyklus beginnt idealerweise mit tonigen Sedimenten, mit darauffolgenden karbonatischen (Kalkstein), sulfatischen (Gips und Anhydrit) und abschließend chloridischen Ablagerungen (Stein- und Kalisalze), die entsprechend ihrer stoffspezifischen Wasserlöslichkeit ausfallen („Eindampfungsabfolge“ (z. B. Warren 2015)). Die mächtigsten Steinsalzablagerungen finden sich in dem sogenannten Staßfurt-Steinsalz (z2-Hauptsalz) im Staßfurt-Zyklus (z2), aus dem auch der Hauptanteil des Salzes in den Zechsteinsalzstöcken stammt (Frisch & Kockel 2004). Ursprüngliche Mächtigkeiten des gesamten Zechstein werden mit bis zu 1500 m im zentralen Beckenbereich rekonstruiert (Baldschuhn et al. 2001; Scheck-Wenderoth et al. 2008). Die Zechstein-Mächtigkeit durch Salzakkumulation innerhalb von Salzdiapiren liegt in Norddeutschland bei ca. 4500 m (Baldschuhn et al. 2001). Die akkumulierte Mächtigkeit des Oberrotliegend- und Zechsteinsalinar innerhalb von Doppelsalinen liegt bei über 7000 m (Baldschuhn et al. 2001).

Die Entwicklung von Salzstrukturen verläuft mehrphasig und beginnt mit stratiformen (flach lagernden) Salzschichten. Diese können zu plastischem Kriechen in Richtung der größten Druckentlastung angeregt werden und in ihrer Mächtigkeit zu sogenannten Salzkissen anschwellen. Die Genese der Salzstrukturen ist durch die Ausprägung der Randsenken ersichtlich, falls diese nicht erodiert wurden (Trusheim 1960). Bei fortschreitender Salzakkumulation ist das Deckgebirge durch Dehnung und Erosion beansprucht und der Salzzustrom kann entlang von Schwächezonen aufsteigen (Hudec & Jackson 2007). Das diapirisch durchgebrochene Salz intrudiert in die mesozoisch-känozoischen Sedimente und bildet Salzstöcke oder langgestreckte Salzmauern aus (Frisch & Kockel 2004). Für den weiteren Aufstieg des Salzdiapirs muss die Aufstiegs geschwindigkeit des Salzes größer als die Sedimentationsrate der Deckgebirgsschichten sowie die Ablagerungsrate im Dachbereich sein (Hudec & Jackson 2007). Das Ende der Phase des „aktiven Diapirismus“ wird zeitlich belegt durch das Vorhandensein von Deckgebirgsschichten, die den Salzdiapir vollständig und mit gleicher Mächtigkeit überdecken. Bei erneutem Salzzustrom („Nachschubstadium“) wird das Deckgebirge aufgewölbt, was mit der Bildung von Scheitelstörungen einhergehen kann (Frisch & Kockel 2004). Die diapirische Phase endet, wenn die mobilen Steinsalzvorkommen in den Kissenfüßen aufgebraucht sind. Durch Ablagerung der löslichen Bestandteile im Dachbereich von Salzstrukturen wird das Hutgestein aus den unlöslichen Rückständen gebildet.

terschiedlichen lithologischen Zusammensetzungen führen zu einem komplexen Internbau mit intensiver Falten tektonik (de Boer 1971). Dennoch weisen die meisten Zechstein-Diapire eine Zweiteilung auf: einen Kern aus weitestgehend homogenem Steinsalz der Staßfurt-Formation und jüngere, weniger mobile Salinargesteine der jüngeren Zyklen, die durch höhere Anhydritanteile charakterisiert sind (Pollok et al. 2016). Der Internbau von Doppelsalinaren wird generell mit einem Oberrotliegendensalinar („Haselgebirge“) im Kern und mit randlich umgebenden jüngeren Zechsteinsalinar beschrieben (Kockel & Krull 1995). Durch die salztektonischen Prozesse ist das Gefüge des Oberrotliegendensalinar homogenisiert und weist siliziklastische Anteile zwischen 2 % und 50 % auf (Henneberg et al. 2018).

Eingangsdaten

Alle Eingangsdaten(-sätze) sind in Tabelle 21 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 21: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname
1	SH	LLUR	11874951/7723	pl/ts	Strukturmodell- StörTief (Thomsen et al. 2017)
2	SH	LLUR	11839735/6220	pl/ts	3D Basismodell SH (Hese et al. 2012)
3	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)
4	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM200

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Das hier hauptsächlich verwendete 3D-Modell StörTief wurde innerhalb des Projektverbundes GeotIS durch das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) erstellt (Thomsen et al. 2017). In dem Verbund wurde das vorher existierende geologische 3D-Basismodell „3D Basismodell SH“ bezüglich der Salzstrukturen und Störungszonen weiterentwickelt und verbessert.

Zur Modellierung der Salzstrukturen in der Nordsee wurde das geologische 3D-Basismodell SH verwendet (Hese et al. 2012), da die Salzstrukturen nicht im Modellumfang des StörTief-Modelles enthalten waren.

Einige der Salzstrukturen grenzen an die Modellgrenze und damit auch an die Landesgrenze Schleswig-Holsteins. Die weitere Bearbeitung dieser angrenzenden Salzstrukturen wird im Rahmen der Arbeiten am Modell von Niedersachsen/Bremen/Hamburg weiterverfolgt. Drei der Gebiete grenzen an Niedersachsen (Namensteil: ..._SH-NI...), zwei an Hamburg (Namensteil: ..._SH-HH...). Innerhalb der Nordsee überschreiten die

Gebiete mit dem Identifier 15 und 16 die 12-Seemeilen-Grenze. An dieser Grenze wurden die Gebiete beschnitten und nicht weiterbearbeitet. Ein kleiner Teil der Salzstruktur „Feuerschiff Elbe“ setzt sich in der 12-Seemeilen-Zone Niedersachsens fort und wird in Gänze im entsprechenden niedersächsischen Modell bearbeitet.

Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen sind in Tabelle 22 beschrieben.

Tabelle 22: Vorgehensweise der Anwendung der Mindestanforderungen.

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Hüllflächen der Salzstrukturen kopieren und Kopie um 300 m absenken	StM_Salzdiapire.ts, StM_Salzdiapire_-300.ts
b) DGM 2x kopieren und Kopie um 300 m und 1500 m absenken	DGM_-300m.ts, DGM_-1500m.ts
c) Neue Hüllflächen aus a) mit DGM_-300m auf Tiefenlage prüfen	
d) Hüllflächen aus a) mit DGM_-1500m verschneiden	StM_Salzdiapire_Cut-1500GOK.ts, StM_Salzdiapire_-300_Cut-1500GOK.ts
e) Abgesenkte Hüllflächen aus d) mit ursprünglicher Hüllfläche aus d) verschneiden und umgekehrt	StM_Salzdiapire_Cut-1500GOK_CutDiapire, StM_Salzdiapire_-300_Cut-1500GOK_CutDiapire
f) Ursprüngliches Top und abgesenkte Flanken löschen sowie eine neue Fläche aus abgesenkten Salzstrukturtops und originalen Flanken generieren	StM_SalzDiapire_reshaped_TOP.ts
g) Distanz/Mächtigkeit zwischen Hüllfläche und DGM_-1500m berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	StM_SalzDiapire_reshaped_TOP_Thickness100m.ts
h) Neue Kurve aus Grenze der Fläche aus g) erstellen, kopieren und auf DGM_-1500m versetzen	Border_100mThickness.pl, Border_100mThickness_lowered.pl
i) Mit der ursprünglichen Kurve und der versetzten Kurve eine neue Fläche erstellen	BorderWall1.ts, ..., BorderWall21.ts
j) Neue Fläche aus g) und i) erstellen und Attribut „Tiefenlage“ erzeugen	MG_d_z-ro_SH_1.ts, MG_d_z-ro_SH_2.ts, etc.

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
3. Export aller Gebiete aus j) als DXF-Datei für die Maximalausdehnungen und txt-Datei im ASCII-Format mit den Attributen „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“	MG_d_z-ro_SH.dxf MG_d_z-ro_SH.txt

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 StandAG Abs. 5

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selbst sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993).

Da in allen ausgewiesenen Gebieten die lithostratigraphischen Einheiten roNA (Oberrotliegend-Salinar), z2NA (Staßfurt-Steinsalz), z3NA (Leine-Steinsalz) und/oder z4NA (Aller-Steinsalz) verbreitet sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als erfüllt angesehen. Der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, gibt für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ eine günstige Bewertung an. Diese ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger (BGE 2020b).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für Steinsalz in steiler Lagerung in den verbleibenden Gebieten in Schleswig-Holstein **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Salinars wurde im dreidimensionalen Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die gesamte Salzstruktur zusammen (inklusive des Hutgesteins). Einige Salzstrukturen besitzen einen flach zulaufenden Überhang, auf den das 100 m-Kriterium aus technischer Machbarkeit nicht angewendet werden konnte. Dies ist jedoch zu vernachlässigen, da für die weitere Betrachtung der Teilgebiete die zentralen Bereiche bevorzugt werden, da dort ein allseitiger Umschließungsgrad gegeben ist und davon ausgegangen wird, dass im Zentrum eher geringere Vorkommen von nicht wirtsgesteinsrelevanten Salinargesteinen anzutreffen sind (Pollok et al. 2016).

- Technische Umsetzung

Das DGM_-1500 m diente als Basisfläche für die Berechnung der vertikalen Mächtigkeit der Salzstrukturen (*Compute_Vertical Thickness*, Tabelle 22, 2g). Das Ergebnis wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ auf der Fläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ der Salzstrukturen wurde mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100 m-

Konturlinien wurden Kurven erzeugt (*New Curve_From Contour Lines*), mit denen die Umhüllenden verschnitten wurde. Geringmächtigere Teile wurden gelöscht. Eine Kopie der Konturlinie wird auf das DGM_-1500 m projiziert (*Project_on surface*) und aus dieser und der ursprünglichen Konturlinie eine neue vertikale Wand erstellt, um die Umhüllenden wieder zu schließen (Tabelle 22, 2h-i).

Zu vermerken ist hierbei, dass im Falle von Überhängen und weiteren Unterschreitungen der 100 m Mindestmächtigkeiten, die in Hüllflächen der Salzdiapire auftreten können, aus technischen Gründen keine weitere Bearbeitung dieser Gebiete erfolgte. Im nachfolgenden Prozess zur weiteren Einengung der Teilgebiete auf Standortregionen ist eine Distanz zu den Flanken der Salzstöcke einzuhalten, sodass diese ungenügend mächtigen Bereiche nicht weiter betrachtet werden.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Als maximale Suchteufe wurden 1500 m festgelegt (BGE 2020m). Als Salzscheibe wurden 300 m oberhalb des potentiellen ewG gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG berücksichtigt.

- Technische Umsetzung

Um das Zusatzkriterium „300 m Salzscheibe“ zu erfüllen wurden die in dem Ausgangsmodell vorhandenen umhüllenden Flächen der Salzstrukturen kopiert und um 300 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 22, 2a). Das Digitale Geländemodell (DGM) für Schleswig-Holstein wurden eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (*Compute_On Object: z.B. Z = Z-300*; Tabelle 22 2b). Das DGM_-300 m sollte nach Anwendung des Kriteriums der Salzscheibe keine Schnittpunkte mit den Salzstrukturen aufweisen und wurde überprüft (*Remove crossover: push down*, Tabelle 22 2c).

Mit dem DGM_-1500 m wurden die Umhüllenden der Salzstrukturen verschnitten und alle Teile unterhalb von 1500 m u. GOK gelöscht (Tabelle 22 2d). Die abgesenkten und originalen Umhüllenden wurden miteinander verschnitten (Tabelle 22, 2e). Das originale Dach (Oberfläche der Salzstruktur) sowie die abgesenkten Flanken wurden gelöscht (*Part_Delete Selection*), sodass nur die innenliegenden Teile verbleiben (Tabelle 22, 2f).

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Steinsalz in steiler Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Automatisiert können Flächen mit geringerer Ausbreitung in der länderübergreifenden Bearbeitung gelöscht werden.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher vorerst als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Schleswig-Holstein können Gebiete ausgewiesen werden, in denen Steinsalz in steiler Lagerung alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 16).

Ergebnis

Durch die Bearbeitung der Salzstrukturen Schleswig-Holsteins konnten 24 Gebiete ermittelt werden, welche voraussichtlich alle Mindestanforderungen erfüllen. Abbildung 16 zeigt einen Überblick über die Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen und sind mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit sowie der minimalen und maximalen Tiefe unter der Geländeoberkante in Tabelle 23 aufgeführt. Die Gebiete erstrecken sich über sämtliche relevante Teufenbereiche von 300 m u. GOK bis 1500 m u. GOK.

Ein Großteil der ermittelten Gebiete liegt im Bereich von strukturbildendem Oberrotliegend-Salinar (Reinhold et al. 2008) und zählen gemäß Pollok et al. (2016) zu den Doppelsalinaren (Oberrotliegend- und Zechstein-Folge). Ausschließlich das Gebiet MG_d_z_SH_1 besteht nur aus Zechstein-Salinar.

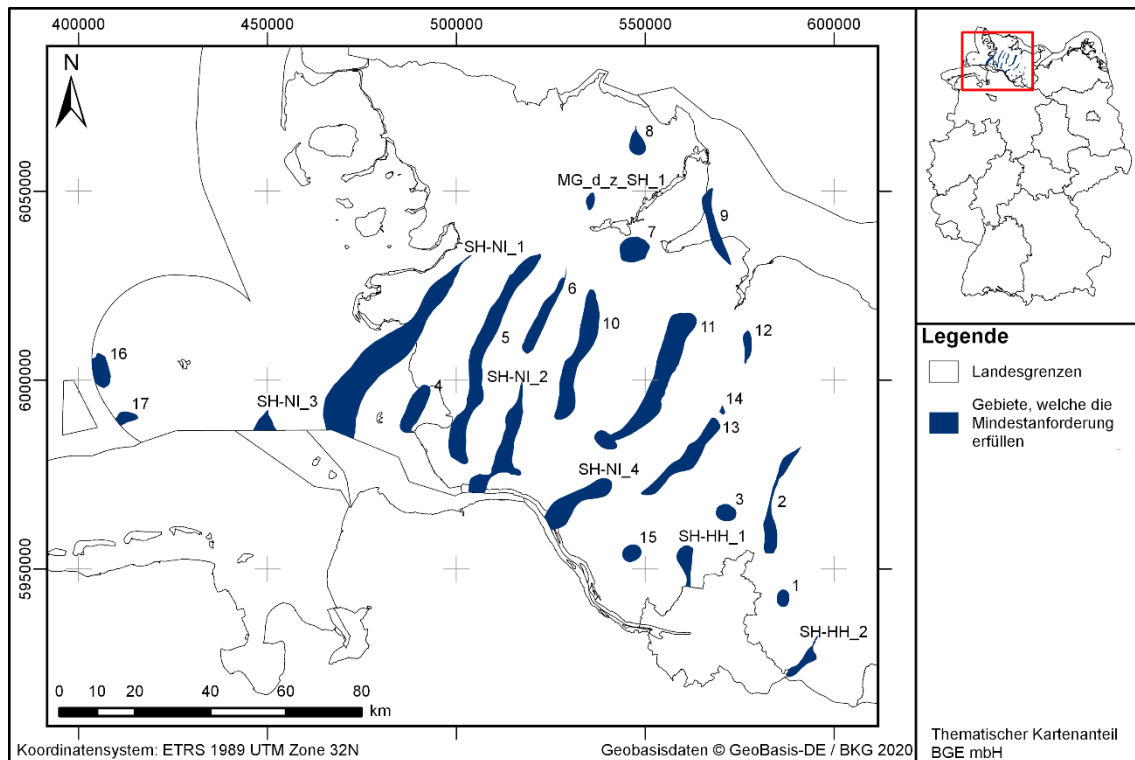


Abbildung 16: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen. Die Benennungen der Gebiete (abgebildet ohne den Präfix „MG_d_z-ro_SH“) ist Tabelle 23 zu entnehmen. Die randlichen Gebiete haben den Präfix „MG_d_z-ro_“.

Tabelle 23: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit und Tiefenlage u. GOK bezogen auf die Hüllfläche des Salzdiapirs (abzüglich der Salzschwebel)

ID-Mindestanforderungs-gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z-ro_SH_1	Siek	1000	500	1500
MG_d_z-ro_SH_2	Sülfeld/Segeberg	1200	300	1500
MG_d_z-ro_SH_3	Sievershütten	1170	330	1500
MG_d_z-ro_SH_4	Büsum	1050	450	1500
MG_d_z-ro_SH_5	Marne/Meldorf/Heide/Hennstedt/Süderstapel	1130	370	1500
MG_d_z-ro_SH_6	Tellingstedt/Pahlhude/Grevenhorst	620	880	1500
MG_d_z-ro_SH_7	Osterby	630	870	1500
MG_d_z-ro_SH_8	Sterup	870	630	1500
MG_d_z-ro_SH_9	Waabs/Schwedeneck	600	900	1500

ID-Mindestanforde- rungs-gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} [m]	Tiefe _{min} [m u. GOK]	Tiefe _{max} [m u. GOK]
MG_d_z-ro_SH_10	Oldenbüttel	740	760	1500
MG_d_z-ro_SH_11	Westensee/Eisendorf/ Gnutz/Meezen/Peissen	840	660	1500
MG_d_z-ro_SH_12	Honigsee/Warnau	470	1030	1500
MG_d_z-ro_SH_13	Mönkloh/Bramstedt	1090	410	1500
MG_d_z-ro_SH_14	Boostedt	180	1330	1500
MG_d_z-ro_SH_15	Elmshorn	1200	300	1500
MG_d_z-ro_SH_16	Josephine	1110	390	1500
MG_d_z-ro_SH_17	Justine	990	510	1500
MG_d_z-ro_SH-HH_1	Quickborn	1170	340	1500
MG_d_z-ro_SH-HH_2	Hohenhorn	700	800	1500
MG_d_z-ro_SH-NI_1	Oldenswort	1190	310	1500
MG_d_z-ro_SH-NI_2	Belmhusen/Sushörn/ Süderhastedt	700	800	1500
MG_d_z-ro_SH-NI_3	Roter Sand	850	650	1500
MG_d_z-ro_SH-NI_4	Krempe/ Lägerdorf	1090	420	1500
MG_d_z_SH_1	Langsee	300	1200	1500

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 24 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 24: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Beschreibung
11874951	7723		StrukturmodellSH2016	Strukturmodell- StörTief (Thomsen et al. 2017)
11839735	6220		3D_Basismodell_SH	3D Basismodell SH (Hese et al. 2012)

1.2 Stratiformes Steinsalz

1.2.1 Zechstein – Brandenburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Zechstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Brandenburg und Berlin. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Zechstein die Salzformationen der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Zechstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Brandenburg und Berlin, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Perm, Zechstein, *Werra-Formation*, *Staßfurt-Formation*, *Leine-Formation*

Der Zechstein (Oberperm) kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Formationen untergliedert werden: Werra-, Staßfurt-, Leine, Aller-, Ohre-, Friesland und Fulda-Formation (z. B. Richter-Bernburg 1955). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Brandenburg und Berlin die Werra-, Staßfurt- und Leine-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Zechstein und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Brandenburg (siehe Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen des Zechstein sind im Untergrund vom südlichen Brandenburg und Teilen Berlins verbreitet. Vor allem im Niederlausitzer Becken sind die Salzvorkommen von der Grenze zu Polen bis nach Sachsen-Anhalt weit verbreitet.

Geologische Beschreibung

Der Zechstein (Oberperm) ist eine lithostratigraphische Einheit, die durch vollmarine Verhältnisse und die Bildung von mächtigen Steinsalzablagerungen geprägt ist (Meschede 2018). Infolge der Zechstein-Transgressionen erfolgte die Füllung des Zentraleuropäischen Beckens. Das Ablagerungsgebiet umfasst in Deutschland das Norddeutsche Becken und zieht sich bis hinein ins Thüringer Becken, das Werra- und Fulda-Gebiet sowie bis nach Nordrhein-Westfalen (Niederrhein). Die Transgressionen fanden in bis zu sieben Zyklen statt (Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland-, Fulda-Formation), die zur Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Gips/Anhydrit und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005b). Dabei sind die Zyklen in den verschiedenen Ablagerungsgebieten durchaus unterschiedlich ausgeprägt.

In der Werra-Formation liegt am Beckenrand über geringmächtigem tonig-kalkigem Sediment eine bis 400 m mächtige Anhydrit/Karbonat-Plattform mit eingeschaltetem Werra-Steinsalz (in lagunärer Position mehr als 200 m mächtig). Weiterhin kommt geringmächtiger Kupferschiefer, überlagert von Zechsteinkalk, unterem Werra-Anhydrit, Werra-Steinsalz und oberem Werra-Anhydrit, vor.

In der Staßfurt-Formation ist das Staßfurt-Karbonat (Ca₂) weiträumig karbonatisch-tonig-bituminös ausgebildet. Der darüber liegende Basalanhydrit A2 ist nur geringmächtig vorhanden, beckenwärts vorwiegend feingeschichtet, im Plattformbereich dagegen überwiegend gröberlagig bis wolkig ausgebildet. Stein- und Kalisalz erreichen Mächtigkeiten von 100 m (Beckenrand) bis 800 m (im Becken).

Die Leine-Formation besteht aus dem 2 – 3 m mächtigen unterem Leineton (feinsandige Schluff- bis Tonlage), fast immer gefolgt von Hauptanhydrit. Darüber folgt das sehr unterschiedlich mächtige Leine-Steinsalz.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 25). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 25: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales-Gelände- Modell
3	BB	LBGR	11878605/ 7872	ts	Brandenburg 3D	3D-Modell (Schilling et al. 2018)
4	BB	LBGR	11884623/ 8939	mdb	Endla- ger_BGE_300_vertr _dsv_pdf	Bohrdatenbank / Schichtenverzeich- nisse
5	BB	LBGR	11842089/ 2867	pdf	4_Geoat- las_Beer_84-85	Karte 24, Atlas der Geologie Branden- burg (Stackebrandt & Lippstreu 2010)
6	DE	BGR	11844870/ 6817	mpk	Zechstein_salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)

Eigenrecherche

Für die Anwendung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung im Zechstein in Brandenburg und Berlin waren keine weiteren Daten oder Karten erforderlich.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Zechstein in Brandenburg und Berlin geprüft wurde, ist in Tabelle 26 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 26: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
4. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
5. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
k) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
l) Erstellen der Bearbeitungsfläche Zechstein aus der Basisfläche Z3 (Basis Werraanhydrit)	b_Zechstein_BB.ts
m) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
n) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
o) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
p) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Zechstein_BB_MACRORESULT.ts
q) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
r) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Zechstein_BB_MACRORESULT_qs.ts
s) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_z_BB.dxf MG_s_z_BB.txt
6. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Polyline-Featureclass in Polygon umwandeln	BB_Zechstein_polygon_neu
b) Zusammenführen	BB_Zechstein_polygon_diss_neu
c) Zerschneiden in einzelne Features	
d) Ggf. Abschneiden an Grenzen	BB_Zechstein_polygon_diss_clip_neu
e) Löschen von zu kleinen Gebieten	
f) Export einer shp-Datei	BB_Zechstein_final_neu2

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 26 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell Brandenburg 3D (B3D) wurde vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) in Zusammenarbeit mit dem Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) entwickelt. Das Modellgebiet umfasst die Bundesländer Berlin und Brandenburg und enthält 12 reflexionsseismische Horizonte (Schilling et al. 2018).

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 26 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisfläche Z3 (Werra-Anhydrit) des 3D-Modells wurde als Bearbeitungshorizont Zechstein verwendet (Tabelle 26, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Brandenburg und Berlin wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 26, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 26, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 26, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Zechstein und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen X1 (Top Zechsteinsalinar), S1 (Top Salinarrör), M1 (Intra-Hauptmuschelkalk), K2 (Top Oberer Gipskeuper), L1 (Intra-Toarc), E1-E2 (Intra-Oxford bis Kimmeridge), T3-T4 (Transgressionsfläche Unteralt bis Wealden), B2-T2 (Transgressionsfläche Mittelalt bis Cenoman), T1 (Transgressionsfläche Känozoikum) sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 26, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 26, Nr. 2f).

Falls in dem Bearbeitungsgebiet 3D-gepufferte Störungen vorhanden sind, wird aus dem Verschnitt mit der Bearbeitungsfläche eine Kurve erzeugt, mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wird. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wird

berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche werden gelöscht (Tabelle 26, Nr. 2g).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 26, Nr. 2h).

Die Bearbeitungsfläche Zechstein wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 26, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Das Wirtsgestein Steinsalz umfasst nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell des Untergrundes. Durch die Verwendung von thematischen Karten und Bohrungsdaten werden Gebiete spezifischer ausgewiesen, die die Mindestanforderungen erfüllen.

1. Einladen der DXF-Dateien in ArcGIS.
2. Erstellen eines Polygon-Features (Tool „Neue Feature-Class“) und kopieren der Objekte und Attribute aus der DXF-Datei in das neue Shape (Tabelle 26, Nr. 3a).
3. Auflösen der feinmaschigen Struktur (Werkzeug „Dissolve“), damit nur ein Objekt vorliegt (Tabelle 26, Nr. 3b).
4. Vergleich mit paläogeographischer Karte (Karte 24, Atlas zur Geologie Brandenburgs). Die Verbreitung der Zechsteinfläche aus 3D-Modell und paläogeographischer Karte stimmen in etwa überein, von daher wurde keine Zuschneidung vorgenommen.
5. Prüfung aller Bohrung von Brandenburg auf ihre Relevanz zu Zechsteinsalinaren. Alle Bohrungen, die Zechsteinsalz in erforderlicher Tiefe und Mächtigkeit anzeigen, liegen innerhalb der aus dem 3D-Modell extrahierten Fläche. Somit ist keine Erweiterung der Fläche erfolgt.
6. Überprüfung der Lage der Fläche. Die Fläche geht teilweise über die Grenzen des Bundeslandes Brandenburg hinaus und reicht in die Gebiete der Bundesländer Sachsen und Sachsen-Anhalt hinein. Da der BGE aus Sachsen keine Hinweise auf Steinsalz in ausreichender Tiefe und Mächtigkeit vorliegen und auch in der Literatur keine Hinweise gefunden wurden, wurde die Fläche im Bereich der Landesgrenze mithilfe der Verbreitungskarte des Zechsteinsalinars aus dem BASAL-Bericht der BGR (Reinhold et al. 2014) abgeschnitten. Der Teil, der nach Sachsen-Anhalt hineinreicht, wurde nicht abgeschnitten, da Zechstein in Sachsen-Anhalt ebenfalls inventarisiert wurde. Dieser wurde zum besseren Abgleich mit den Ergebnissen aus Sachsen-Anhalt beibehalten (Tabelle 26, Nr. 3d). Eine eventuelle Zuschneidung erfolgt dann in der deutschlandweiten Bearbeitung des Zechstein.

7. Zerschneiden der Gesamtfläche in einzelne Gebiete (Werkzeug „Trennen“) (Tabelle 26, Nr. 3c), Bestimmung des Flächeninhalts der Gebiete, Eliminierung zu kleiner (kleiner als 3 km²) Gebiete (Tabelle 26, Nr. 3e).
8. Benennung der einzelnen Gebiete („BB_Zechstein_MA_1“, ...), anschließender Export der shape-Datei zur weiteren Verwendung (Tabelle 26, Nr. 3f).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10⁻²¹ m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10⁻¹² m/s und weniger.

Die Steinsalzsichten der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formation enthalten gemäß der Inventarisierungstabelle für Brandenburg (siehe Kapitel 5) Steinsalz. Da in allen ausgewiesenen Gebieten diese Einheit verbreitet ist, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **erfüllt** eingeschätzt.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Die Mächtigkeit des Zechstein wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Zechstein zwischen der Basis Werraanhydrit und dem Top des Zechsteinsalinars zusammen.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass die Salzformationen des Zechstein in erforderlicher Mächtigkeit vorliegen.

In den verbleibenden Gebieten wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Die Tiefenlage des Zechstein wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass der Wirtsgesteinshorizont in erforderlicher Tiefe vorliegt.

In den verbleibenden Gebieten wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 17 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Zechstein in Brandenburg und Berlin dargestellt.

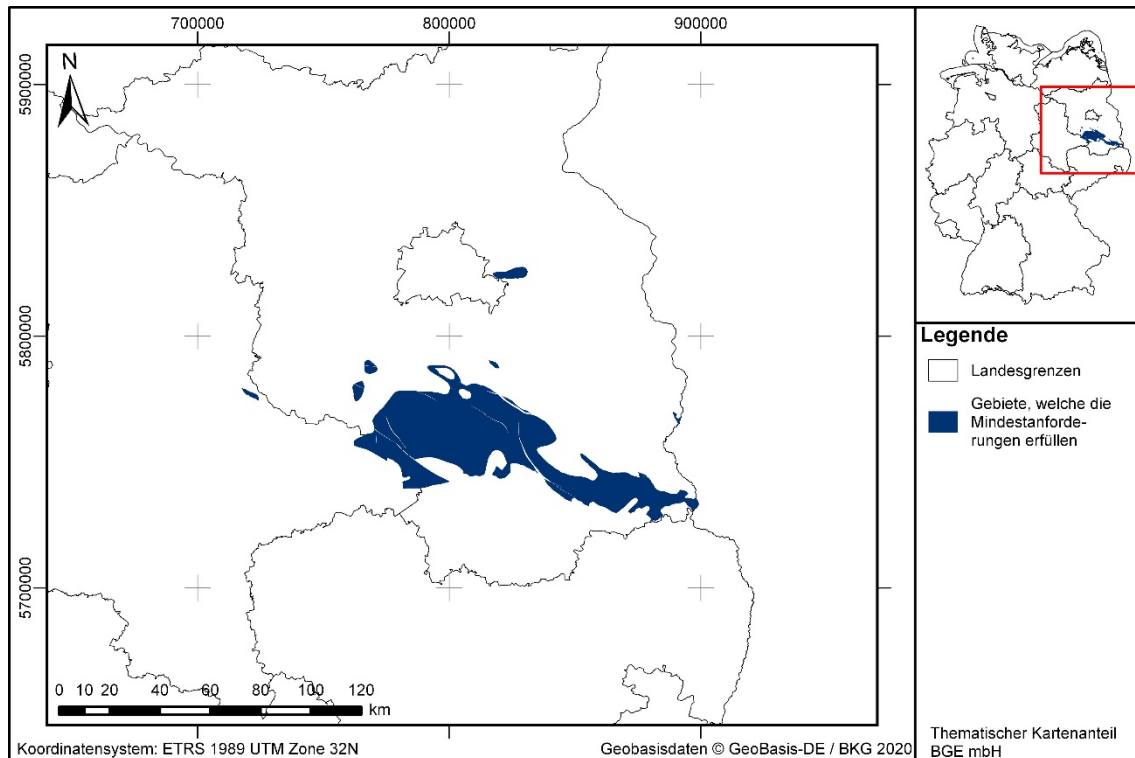


Abbildung 17: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Brandenburg und Berlin. Die Abbildung 18 zeigt ein tiefengeologisches Profil durch die Norddeutsche Senke und ist damit ein charakteristischer Schnitt durch den Zechstein in Brandenburg.

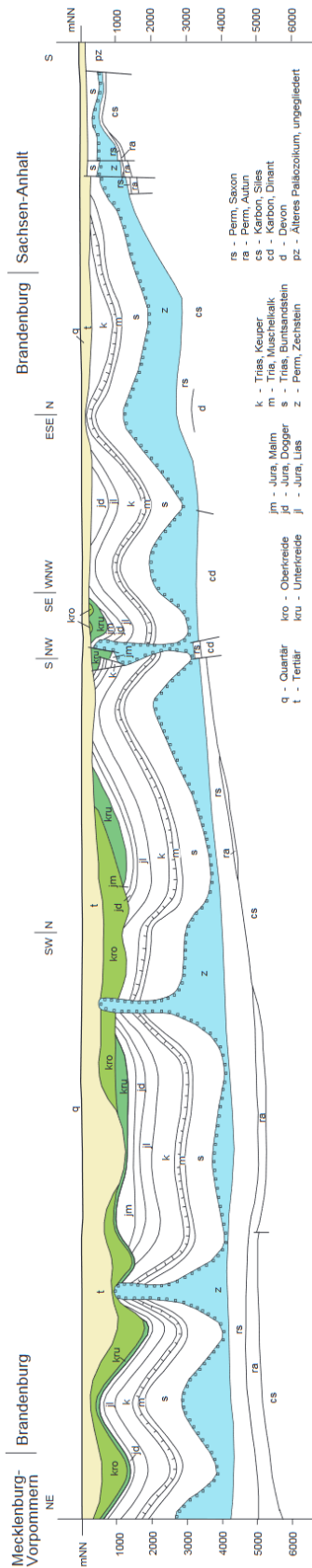


Abbildung 18: Tiefengeologisches Profil durch die Norddeutsche Senke, Anteil Brandenburg (Stackebrandt & Lippstreu 2010)

Eine Auflistung der Gebiete in Brandenburg und Berlin, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 27 zu finden.

Tabelle 27: *Auflistung aller Gebiete in Brandenburg und Berlin, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche*

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
BB_Zechstein_MA_1	27
BB_Zechstein_MA_2	275
BB_Zechstein_MA_3	6
BB_Zechstein_MA_4	8
BB_Zechstein_MA_5	12
BB_Zechstein_MA_6	20
BB_Zechstein_MA_7	6
BB_Zechstein_MA_8	13
BB_Zechstein_MA_9	2357
BB_Zechstein_MA_10	7
BB_Zechstein_MA_11	8
BB_Zechstein_MA_12	45

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 28 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 28: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank*

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11878605	7872	Brandenburg 3D		3D-Modell
11884623	8939	Endlager_BGE_300_vertr_dsv_pdf	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind im Anhang aufgelistet	Bohrdatenbank aus BB

DokID	Grup- pen-ID	Name des Daten- satzes	Entscheidungserhebli- ches Datum aus der Datei	Beschreibung
11842089	2867	4_Geoat- las_Beer_84-85	Verbreitungsgrenze	Karte 24, Atlas der Geologie Brandenburg: Paläogeographische Karte zu Zechstein; teilweise zur Grenzziehung verwendet
11844870	6817	Zechstein_salinar	Verbreitungsgrenze	Die Verbreitungsgrenze des Zechstein-Salinars wurde teilweise als Bewertungsgrundlage herangezogen

1.2.2 Zechstein – Hessen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Zechstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Hessen. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Zechstein die Salzformationen der Werra-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Zechstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Hessen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Perm, Zechstein, *Werra-Formation*

Der Zechstein (Oberperm) kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Formationen untergliedert werden: Werra-, Staßfurt-, Leine, Aller-, Ohre-, Friesland und Fulda-Formation (z. B. Richter-Bernburg 1955). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Hessen die Werra-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Zechstein und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Hessen (siehe Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen des Zechstein sind im Untergrund von Hessen weit verbreitet. Sie kommen im Werra-Kaligebiet und Fulda-Kaligebiet im Osten Hessens an der Grenze zu Thüringen sowie im nördlichen Hessen an der Grenze zu Niedersachsen vor.

Geologische Beschreibung

Der Zechstein (Oberperm) ist eine lithostratigraphische Einheit, die durch vollmarine Verhältnisse und die Bildung von mächtigen Steinsalzablagerungen geprägt ist (Meschede 2018). Infolge der Zechstein-Transgressionen erfolgte die Füllung des Zentraleuropäischen Beckens. Das Ablagerungsgebiet umfasst in Deutschland das Norddeutsche Becken und zieht sich bis hinein ins Thüringer Becken, das Werra- und Fulda-Gebiet sowie bis nach Nordrhein-Westfalen (Niederrhein). Die Transgressionen fanden in bis zu sieben Zyklen statt (Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland-, Fulda-Formation), die zur Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Gips / Anhydrit und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005b). Dabei sind die Zyklen in den verschiedenen Ablagerungsgebieten durchaus unterschiedlich ausgeprägt.

Die Werra-Formation besteht generell aus einer bis zu 0,5 m mächtigen Schicht aus Unterem Werra-Ton, gefolgt von bis zu 20 m mächtigen Karbonaten. Auflagernd befindet sich bis zu 9 m mächtiger Anhydritknotenschiefer und bis zu 25 m mächtiger Unterer Anhydrit. Anschließend beginnt eine Abfolge von mächtigen Steinsalzlagen (bis zu 110 m mächtiges Unteres Werra-Steinsalz, bis zu 60 m mächtiges Mittleres Werra-Steinsalz und bis zu 150 m mächtiges Oberes Steinsalz), jeweils separiert durch bis zu 10 m mächtige Kalisalzvorkommen (Kaliflöz Thüringen) bzw. 3 m mächtiges Kalisalz (Kaliflöz Hessen). Dann folgt der Obere Werra-Ton mit einer Mächtigkeit von bis zu 12 m, der Obere Anhydrit von bis zu 7 m, einer eingelagerten Schicht an Oberstem Steinsalz mit bis zu 15 m Mächtigkeit, und abschließend 2 m mächtiger Oberer Anhydrit.

Das Beckeninnere des Werra-Gebietes zeichnet sich durch sehr mächtige Werra-Steinsalzablagerungen aus. Diese können in einigen Regionen bis zu 400 m mächtig sein (Käding 1975; Mayrhofer 1967). Im Randbereich des Werra-Gebietes sind die Ablagerungen des Werra-Steinsalzes deutlich geringer, wobei ein weiterer Grund in der Ablagerung des Steinsalzes zu finden ist (Kupfahl 1965). Das Untere Werra-Steinsalz besteht aus einem weißlich-grauen Steinsalz, das im hangenden Bereich eine rötliche Färbung annimmt. Es ist mit dünnen anhydritischen Zonen gebankt. Das Mittlere Werra-Steinsalz ist ein fein- bis mittelkristallines, hell- bis mittelgraues Steinsalz und unregelmäßig anhydritisch gebankt (Roth 1967; Käding 1975). Das Obere Werra-Steinsalz weist eine Dreigliederung durch Kieserit-, Anhydrit- und Toneinschaltungen auf. Im unteren Bereich zeichnet es sich durch grauweißes Steinsalz aus, das mit Sylvinit- und Kieseritbändern gebankt ist. Nach oben hin wird das Steinsalz rötlicher und weist einen höheren Anhydritgehalt auf. Der oberste Bereich zeigt ein rötliches Steinsalz, das grobspätig ist und blau-grüne bis graue Tonbänke eingelagert hat (Mayrhofer 1967; Roth 1967). Im Werra-Gebiet kann das Staßfurt-Steinsalz nur in sehr geringmächtigen Schichten mit maximal 10 m Mächtigkeit nachgewiesen werden (Käding 1975; Mayrhofer 1967), welches zum Randbereich des Werra-Gebietes weiterhin an Mächtigkeit verliert (Kupfahl 1965).

Das Fulda-Gebiet, das durch ein Grabensystem vom Werra-Gebiet getrennt ist und die südwestliche Fortsetzung darstellt, weist im Vergleich zum Werra-Gebiet mit etwa 200 m Mächtigkeit geringmächtigere Werra-Steinsalzablagerungen auf (Kupfahl 1965; Roth & Laemmlen 1970). Das Fulda-Gebiet zeigt den gleichen Aufbau der Steinsalzsichten

wie im Werra-Gebiet. Es unterscheidet sich lediglich in der Mächtigkeit und der Ausbildung der einzelnen Steinsalzschichten. Während das Untere und Mittlere Werra-Steinsalz ähnliche Mächtigkeiten zu den analogen Folgen des Werra-Gebietes aufweisen, ist das Obere Werra-Steinsalz nur halb so mächtig. Das Untere und Mittlere Werra-Steinsalz ist von weißer bis grauer Farbe, wobei untergeordnet auch eine gelborangene Färbung auftritt; das Obere Steinsalz hingegen zeigt eine orangerote bis bräunliche Färbung. Das gesamte Steinsalz ist mittel- bis grobkristallin sowie geschichtet mit tonig-anhydritischen Lagen. Teilweise sind auch reine, spätige Steinsalzschichten zu finden. Analog zum Staßfurt-Steinsalz im Werra-Gebiet ist auch das Steinsalz im Fulda-Gebiet bis zu 10 m mächtig (Roth & Laemmlen 1970).

In Nordhessen an der Grenze zu Niedersachsen befindet sich das Solling-Becken, wobei das Beckeninnere in Niedersachsen liegt. Werra-Steinsalz ist dort nicht oder nur in sehr geringer Mächtigkeit anzutreffen. Sehr ausgeprägt liegt das Staßfurt-Steinsalz mit Mächtigkeiten von etwa 350 m im Beckeninneren in Südniedersachsen und von bis zu etwa 150 m im Randbereich des Solling-Beckens in Hessen vor. Das Leine-Steinsalz erreicht im Beckeninneren ungefähre Mächtigkeiten von 100 m in Niedersachsen und im Randbereich des Beckens etwa 25 m in Hessen. Das Aller-Steinsalz weist im Beckeninneren ungefähr eine Mächtigkeit von 150 m und im Randbereich von 75 m auf (DokID11841779).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 29). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurde diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 29: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	HE	HLNUG	11841938/507	pl/ts	Modell Hessen 3D	3D-Modell (Arndt & Bär 2011)
2	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
3	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM200	Digitales Geländemodell

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
4	DE	BGR	11844870_01/ 6821	pdf	BGR_Salzkarte_Begleitinformationen.pdf & BGR_Salzkarte_BlattA_150dpi.pdf	Übersichtskarte zur Salzverbreitung mit Informationen
5	HE	HLNUG	11877033/781 2	mdb	hlug	Bohrdatenbank
6	DE	BGR	11844870_01/ 6817	mpk	Zechstein_salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 29 genannten Eingangsdaten wurde folgende thematische Karte verwendet:

Ziegler (1989): *North German Zechstein facies patterns in relation to their substrate*. Geologische Rundschau, Bd. 78, S. 105-127. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/BF01988356.

- Verbreitungskarte des Werra-Anhydrits mit dem Werra-Steinsalz (Abbildung 3)

Die paläogeographische Karte von Ziegler (1989) erstreckt sich über weite Teile von Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Hessen, Thüringen, Bayern und Sachsen-Anhalt und behandelt die Werra-Formation. Für das Werra-Steinsalz sind die Ablagerungsbereiche ohne Mächtigkeitinformationen angegeben.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Zechstein in Hessen geprüft wurde, ist Tabelle 30 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 30: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Zechstein aus den Topflächen PräPerm und Rotliegend	b_Zechstein_HE_ini.ts
c) Bearbeitungsfläche Zechstein auf Gebiete zuschneiden, welche eine Topfläche Zechstein aufweisen	b_Zechstein_HE.ts
d) Topfläche erzeugen: aus der Topfläche Zechstein (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
f) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
g) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Zechstein_HE_MACRORESULT.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Zechstein_HE_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_z_HE.dxf MG_s_z_HE.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Polygon-Featureclass der DXF-Fläche in 2D-Polygon umwandeln	HE_Zechstein_Polygon
b) Dissolve des 2D-Polygons	HE_Zechstein_Polygon_Diss
c) Georeferenzieren und Vektorisieren der Salzvorkommen aus den Paläogeographischen Karten (Ziegler, BASAL)	Ziegler_Salzvorkommen, BASAL_Zechstein
d) Salzvorkommen Zechstein mit Modellfläche verschneiden („Überschneiden“)	HE_Zechstein_Polygon_Diss_Ziegler, HE_Zechstein_Polygon_Diss_BASAL
e) Zusammenführen („Merge“) beider Features (HE_Zechstein_Polygon_Diss_Ziegler, HE_Zechstein_Polygon_Diss_BASAL)	HE_Zechstein_Polygon_Diss_Karten

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
f) Einladen der vorgefilterten Bohrungen („XY-Tabelle in Punkt“)	HE_Salz_gefiltert
g) Sortieren der Bohrungen nach Mächtigkeit Salz unter Entfernung der Bohrungen mit Salz in kleiner als 300 m und größer als 1500 m Tiefe	HE_Bohrungen_Zechstein_Salz_groesser_100m
h) Vergrößern der Fläche nach Informationen aus Bohrungen, alle Gebiete zu einem zusammenfügen („merge“ und „dissolve“) und in einzelne Features zerschneiden („Trennen“)	HE_Zechstein_Polygon_Diss_Karten_Bohrungen
i) Löschen von zu kleinen Gebieten	
j) Export einer Shape-Datei	HE_Zechstein_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 30 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische 3D-Modell ist das Hessen3D-Modell des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLUNG) (Arndt & Bär 2011). Es ist aus der Projektarbeit „3D-Modell der geothermischen Tiefenpotentiale von Hessen“ der Technischen Universität Darmstadt entstanden. Es wird die komplette Fläche des hessischen Bundeslandes abgebildet und beinhaltet Isothermen (60 °C, 100 °C, 120 °C und 150 °C), Störungsflächen (s_geologie_Stoerungen) sowie insgesamt 6 Topflächen von folgenden stratigraphischen Einheiten:

- s_geologie_QuartaerTertiaer = Quartär und/oder Tertiär
- s_geologie_MuschelkalkKeuper = Muschelkalk und/oder Keuper
- s_geologie_Buntsandstein = Buntsandstein
- s_geologie_Zechstein = Zechstein
- s_geologie_Rotliegend = Rotliegend
- s_geologie_PraePerm = Alle Gesteine älter als Perm

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 30 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – g automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Bearbeitungsfläche wurde aus den Topflächen PräPerm und Rotliegend generiert. Bereiche der Topfläche PräPerm wurden durch das Top Rotliegend ersetzt, sollte dieses höher liegen (Tabelle 30, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Hessen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 30, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 30, Nr. 2e). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 30, Nr. 2f).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Zechstein und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus der Topfläche des Buntsandstein sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 30, Nr. 2d). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 30, Nr. 2g).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300-1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 30, Nr. 2h). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten. Vereinzelt werden Bohrungsdaten in Kombination mit 2D-Profilschnitten herangezogen, um zusätzliche Informationen zur Tiefenlage bzw. Lagerung und Mächtigkeit des Wirtsgesteins in der endlagerrelevanten Tiefe zu erhalten.

Die Bearbeitungsfläche Zechstein wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 30, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Das Wirtsgestein Steinsalz umfasst nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell Hessens. Durch die Verwendung von thematischen Karten und Bohrungsdaten wurden Gebiete spezifischer ausgewiesen, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Alle verwendeten Informationen (vgl. Tabelle 29) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt (Tabelle 30, Nr. 3). Die aus dem Geomodell extrahierten Flächen, die

eine Mindestmächtigkeit des Zechstein von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m und 1500 m vorkommen, wurden zunächst in das GIS-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wird (Tabelle 30, Nr. 3a und 3b). Zusätzlich wurden die Verbreitungskarten des Salzes im Zechstein aus dem BASAL-Bericht (Reinhold et al. 2014) sowie von Ziegler (1989) importiert sowie die Karte von Ziegler (1989) georeferenziert und vektorisiert (Tabelle 30, Nr. 3c). Beim Vergleich der paläogeographischen Karten mit den Modellflächen gab es größere Unterschiede. Die Modellflächen wiesen eine sehr viel größere Ausbreitung auf, da die Modellflächen die gesamte Zechsteinverbreitung zeigen, die paläogeographischen Karten beschränken sich dagegen auf die Steinsalzverbreitung. Deswegen wurden die Modellflächen mit der Steinsalzverbreitung aus den paläogeographischen Karten verschnitten (Tabelle 30, Nr. 3d und 3e). Es entstanden Flächen, die Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und in einer Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m aufweisen und die gemäß der Verbreitungskarten Steinsalz aufweisen.

Um einen Positivbeweis der Flächen durchführen zu können, wurden Bohrungen so weit gefiltert, dass diese Bohrungen Steinsalz im Zechstein in der richtigen Tiefenlage zeigen. Dann wurden die Bohrungen in das GIS-Projekt importiert (Tabelle 30, Nr. 3f) und die Bohrungen nach Mächtigkeiten von Salz sortiert. So entstand eine Shape-Datei, die die Bohrungen mit Salzmächtigkeiten von mehr als 100 m enthält (Tabelle 30, Nr. 3g).

Die aus der Verschneidung der paläogeographischen Karten mit den Modellflächen entstandenen Flächen wurden anhand der Bohrungen überprüft. Lagen Bohrungen mit Salzmächtigkeiten größer als 100 m außerhalb von Flächen mit ausreichender Zechsteinmächtigkeit, wurden diese Flächen um die Bohrungen vergrößert. Dafür wurden die Bohrungen mit Puffern umgeben, die dem Abstand bis zur nächsten Fläche entsprechen. Diese Puffergebiete wurden der Fläche hinzugefügt. Außerdem wurde ein Abgleich durchgeführt zwischen Flächen, die durch die Verschneidung mit den paläogeographischen Karten weggefallen sind, und der Lage der Bohrungen. Lagen Bohrungen in Gebieten, die durch die Verschneidung eliminiert wurden, sind diese Flächen dennoch wieder in das weitere Verfahren aufgenommen worden, da die Bohrungen eine Salzmächtigkeit von mehr als 100 m anzeigen und die Modellflächen dort Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und richtiger Tiefenlage aufweisen. Dies war bei zwei nahe beieinanderliegenden Bohrungen der Fall, sodass die Modellfläche wieder aufgenommen wurde. Die anderen relevanten Bohrungen lagen alle innerhalb der aus dem Modell extrahierten Flächen und den Verbreitungskarten, sodass hier keine Erweiterung erfolgen musste (Tabelle 30, Nr. 3h).

Anschließend wurden die neu entstandenen Gebiete hinsichtlich ihrer Fläche überprüft und Gebiete mit einer Fläche von weniger als 3 km² aufgrund der Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ gelöscht (Tabelle 30, Nr. 3i). Die verbleibenden Gebiete wurden benannt und anschließend als Shape-Datei exportiert (Tabelle 30, Nr. 3j).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die lithostratigraphische Einheit z1NA (Werra-Steinsalz) hat gemäß der Inventarisierungstabelle für Hessen (siehe Kapitel 5) als Hauptkomponente Steinsalz. Diese Einheit ist in allen ausgewiesenen Gebieten verbreitet.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für das Wirtsgestein Steinsalz im Zechstein in den verbleibenden Gebieten in Hessen **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Die Mächtigkeit des Zechstein wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Zechstein zwischen der Basis und dem Top des Zechstein zusammen.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass der Wirtsgesteinshorizont in erforderlicher Mächtigkeit vorliegt.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Die Tiefenlage des Zechstein wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass der Wirtsgesteinshorizont in erforderlicher Tiefe vorliegt.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Tiefe des einflusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 19 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Zechstein in Hessen dargestellt.

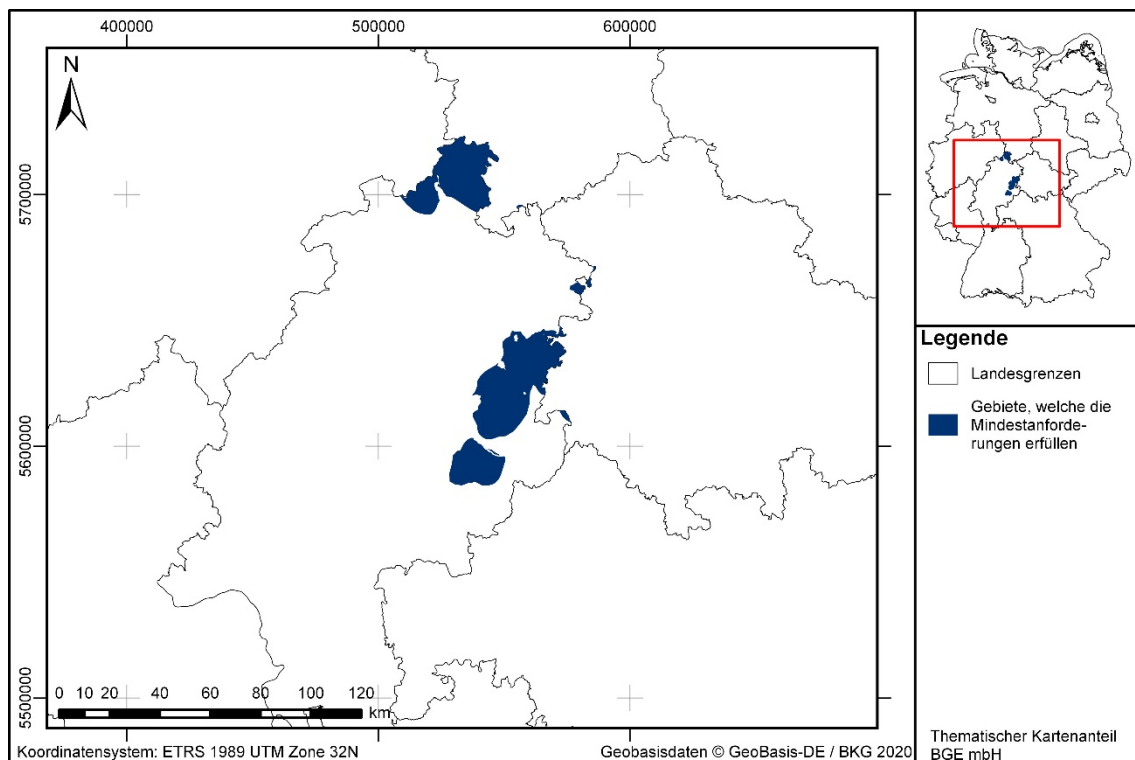


Abbildung 19: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Hessen

In Abbildung 20 ist ein Querprofil vom Süden Hessens im Werra-Becken bis in den Norden Hessens und nach Südniedersachsen ins Solling-Becken hinein dargestellt.

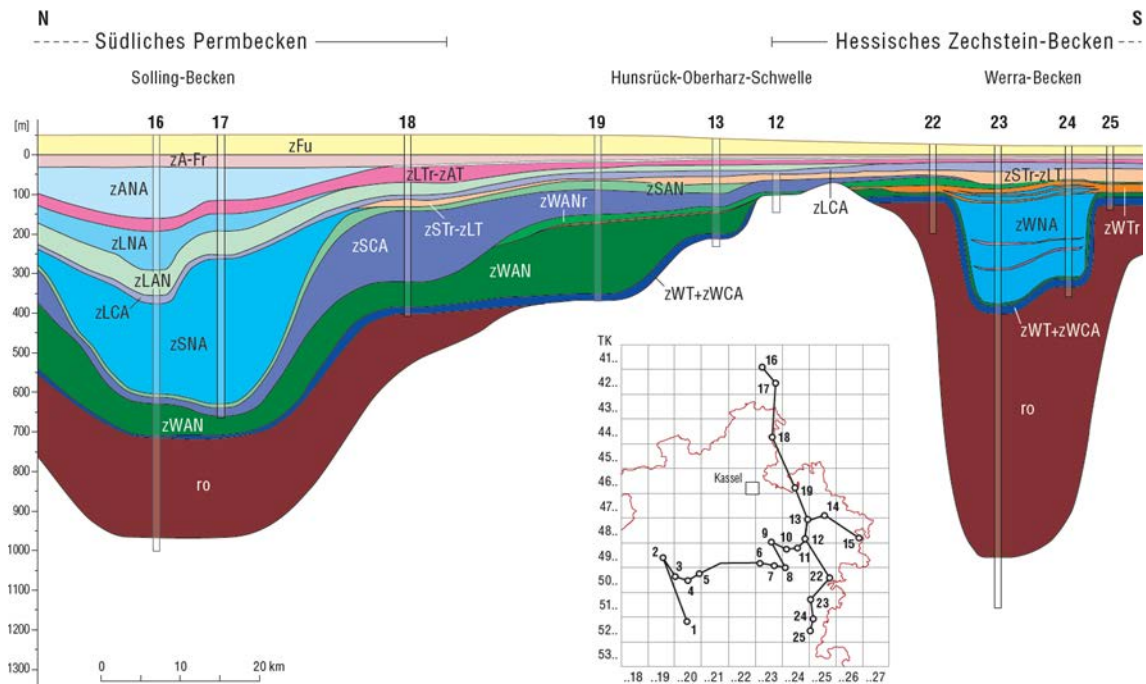


Abbildung 20: Profilschnitt durch das Werra-Becken bis ins Solling-Becken im nördlichen Hessen im Übergang zu Niedersachsen (DokID11841779)

Eine Auflistung der Gebiete in Hessen, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 31 zu finden.

Tabelle 31: Auflistung aller Gebiete in Hessen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_HE_1	3
MG_s_z_HE_2	289
MG_s_z_HE_3	9
MG_s_z_HE_4	887
MG_s_z_HE_5	18
MG_s_z_HE_6	5
MG_s_z_HE_7	0,05
MG_s_z_HE_8	1
MG_s_z_HE_9	2
MG_s_z_HE_10	0,005
MG_s_z_HE_11	0,001

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_HE_12	619

Die Gebiete, die kleiner als 3 km² sind, liegen an der Landesgrenze von Hessen und gehen evtl. ins Nachbarland weiter. Deswegen wurde diese hier nicht aussortiert.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 32 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 32: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11841938	507	Modell Hessen3D		3D-Modell (Arndt & Bär 2011)
11877033	7812	hlug	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind im Anhang aufgelistet	Bohrdatenbank
11844870_01	6817	Zechstein_salinar	Verbreitungsgrenze	Die Verbreitungsgrenze des Zechstein-Salinars wurde als Bewertungsgrundlage herangezogen

Darüber hinaus werden die Umriss der Gebiete im Werra-Fulda-Becken und in Nordhessen durch die 100-m-Isopache des Vorkommens des Steinsalzes der Werra-Formation folgender Karte als entscheidungserheblich angesehen:

- Ziegler (1989): *North German Zechstein facies patterns in relation to their substrate*. Geologische Rundschau, Bd. 78, S. 105-127. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/BF01988356
 1. Verbreitungskarte des Werra-Anhydrits mit dem Werra-Steinsalz, Abbildung 3, Seite 110.

1.2.3 Zechstein – Mecklenburg-Vorpommern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Zechstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Mecklenburg-Vorpommern. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Zechstein die Salzformationen der Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Zechstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Perm, Zechstein, *Staßfurt-Formation*, *Leine-Formation*, *Aller-Formation*

Der Zechstein (Oberperm) kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Formationen untergliedert werden: Werra-, Staßfurt-, Leine, Aller-, Ohre-, Friesland und Fulda-Formation (z. B. Richter-Bernburg 1955). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Mecklenburg-Vorpommern die Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Zechstein und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Mecklenburg-Vorpommern (siehe Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen des Zechstein sind im Untergrund von Mecklenburg-Vorpommern weit verbreitet. Diese kommen in Nordostmecklenburg im Bereich von Rügen sowie im Rückland der Mecklenburgischen Seenplatte südöstlich von Rostock vor.

Geologische Beschreibung

Der Zechstein (Oberperm) ist eine lithostratigraphische Einheit, die durch vollmarine Verhältnisse und die Bildung von mächtigen Steinsalzablagerungen geprägt ist (Meschede 2018). Infolge der Zechstein-Transgressionen erfolgte die Füllung des Zentraleuropäischen Beckens. Das Ablagerungsgebiet umfasst in Deutschland das Norddeutsche Becken und zieht sich bis hinein ins Thüringer Becken, das Werra- und Fulda-Gebiet sowie bis nach Nordrhein-Westfalen (Niederrhein). Die Transgressionen fanden in bis zu sieben Zyklen statt (Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland-, Fulda-Formation), die zur Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Gips/Anhydrit und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005b). Dabei sind die Zyklen in den verschiedenen Ablagerungsgebieten durchaus unterschiedlich ausgeprägt.

Da Mecklenburg-Vorpommern innerhalb des Mitteleuropäischen Zechsteinbeckens liegt, ist, abgesehen von Nord-Rügen, überall Zechstein im Land vorhanden. Die Grenze des Zechstein-Beckens verläuft über Rügen. Somit sind auch die für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle interessanten mehr als 100 m mächtigen Steinsalzhorizonte (Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation) im gesamten Bundesland (bis auf das nördliche Rügen) vertreten. Die Oberfläche des Zechstein liegt dabei in Tiefen zwischen 800 m und 3000 m, wobei diese in Richtung Südwesten zunimmt. Die Mächtigkeit des Zechstein schwankt in Mecklenburg-Vorpommern zwischen wenigen hundert bis einigen tausend Metern, wobei diese stark von halokinetischen Bewegungen beeinflusst ist (Zagora & Zagora 2004).

Das Untere Staßfurt-Steinsalz (z2NA) ist bis zu 1871,9 m mächtig. Es ist glasklar und weiß und ist fast im gesamten Gebiet Mecklenburg-Vorpommerns vorhanden, wobei es am nördlichen Beckenrand auskeilt. Der Beckenrand verläuft über die Insel Rügen. In Richtung Beckeninneren nimmt die Mächtigkeit stark zu und kann mehr als 1000 m erreichen (Zagora & Zagora 2004). Das Untere Staßfurt-Steinsalz weist starke Mächtigkeitsunterschiede bis 100 m aufgrund der umfassenden halokinetischen Vorgänge auf. Das Obere Staßfurt-Steinsalz (z2NAr) wird durch das bis zu 197,9 m mächtige Kalilager Staßfurt (z2K) vom Unteren Staßfurt-Steinsalz getrennt. Das Obere Staßfurt-Steinsalz erreicht Mächtigkeiten bis zu 5 m, weshalb es als potentielles Wirtsgestein nicht in Frage kommt.

Das Leine-Steinsalz und Kalilager (z3NA-K) erreicht Mächtigkeiten zwischen 8 m und 322 m. Es handelt sich um ein von Anhydrit durchzogenes, milchig weißes bis glasklares Steinsalz, wobei im Beckeninneren Kalisalze vorhanden sind (Zagora & Zagora 2004).

Das Aller-Steinsalz (z4NA) ist ein 6,6 m bis 151 m mächtiges Steinsalz, welches aus Basis-, Schnee-, Schwaden- und Tonflockensalz besteht. Es kann in beckenzentralen Bereichen Äquivalente des Aller-Kalilagers führen (Zagora & Zagora 2004).

Das Werra-Steinsalz (z1NA) besteht in Mecklenburg-Vorpommern aus Steinsalz, das teils anhydritisch ist, und weist Mächtigkeiten zwischen 0,2 m und 47,4 m auf. Das Ohre-Steinsalz (z5NA) ist ein 0,3 m bis 49,5 m mächtiges Steinsalz, das Einlagerungen von

Kalisalzen im Raum Schwerin aufweist. Das Friesland-Steinsalz und Ton (z6NA) besteht aus einem 8,5 m bis 39 m mächtigem Steinsalz. Das Mölln-Steinsalz (z7NA) besteht aus einem 5 m bis 15 m mächtigem Steinsalz, das Wechsellagerungen von rotbraunem, karbonatischem Steinsalz und Anhydrit aufweist. Diese vier Formationen des Zechsteinsalzes sind in Mecklenburg-Vorpommern als potentiell Wirtsgestein zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle nicht mächtig genug.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 33). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 33: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BGE	11902082/9770	ts/pl	MV_SKUA_Export	SPBA-3D für Mecklenburg-Vorpommern (Doornenbal & Stevenson 2010)
2	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
3	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Bundesländergrenzen inkl. 12-Seemeilen-Zone
4	DE	BGR		pdf	InSpEE-Bericht	PDF-Bericht zum InSpEE-Projekt (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
5	DE	BGR	11842726/7632	shp	Strukturumrisse_500m	Digitale Höhenlinien InSpeEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
6	DE	BGR	11842726/7633	shp	Strukturumrisse_1000m	Digitale Höhenlinien InSpeEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)

Nr.	Bun- des- land	Be- hörde	DokID Datei- gruppe	Datenfor- mat	Dateiname	Bemerkungen
7	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturumrisse_1500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesen- berg 2016; Pollok et al. 2016)
8	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturumrisse_2000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesen- berg 2016; Pollok et al. 2016)
9	DE	BGR	11844870_ 01/ 6821	pdf	BGR_Salzkarte_Be- gleitinformationen.pdf & BGR_Salz- karte_BlattA_150dpi.pdf	Übersichtskarte zur Salzverbreitung mit In- formationen
10	MV	LUNG	11888776/9 164	mdb	LUNG_SVZ_Kurz_2020 _02_06	Bohrdatenbank
11	MV	LUNG	11899243_ 02/9611	mdb	BGE_SVZ_2020_05	Bohrdatenbank

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 33 genannten Eingangsdaten wurden folgende thematische Karten verwendet:

Franke, D. (2020): *Geologie von Ostdeutschland (Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern) - Ein Kompendium*. Glienicke/Nordbahn: Dietrich Franke. Letzte Aktualisierung am: Last updated 12.02.2020. Zugriff am: 01.03.2020. <http://www.regionalgeologie-ost.de/>:

1. Abb. 12: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Staßfurt-Formation (Zechstein 2) in Ostdeutschland
2. Abb. 13: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Leine-Formation (Zechstein 3) in Ostdeutschland
3. Abb. 14: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Aller-Formation, Ohre-Formation, Friesland-Formation und Fulda-Formation (Zechstein 4-7) in Ostdeutschland

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Zechstein in Mecklenburg-Vorpommern geprüft wurde, ist in Tabelle 34 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 34: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Zechstein aus der Basisfläche Zechstein MV_220_z_iso_rev01 (aus allen Kacheln)	b_Zechstein_MV.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Zechstein_MV_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Zechstein_MV_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_z_MV.dxf MG_s_z_MV.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Polygon-Featureclass der DXF-Fläche in 2D-Polygon umwandeln	MV_Zechstein_Polygon
b) Dissolve des 2D-Polygons	MV_Zechstein_Polygon_Diss

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Georeferenzieren und Vektorisieren der Salzvorkommen aus Paläogeographischen Karten	Verbreitung_Staßfurt, Verbreitung_Leine, Verbreitung_Aller
d) Salzvorkommen Zechstein mit Modellfläche verschneiden („Überschneiden“)	MV_Zechstein_Polygon_Diss_Staßfurt, MV_Zechstein_Polygon_Diss_Leine, MV_Zechstein_Polygon_Diss_Aller
e) Zusammenführen („Merge“) der drei Features (MV_Zechstein_Polygon_Diss_Staßfurt, MV_Zechstein_Polygon_Diss_Leine, MV_Zechstein_Polygon_Diss_Aller)	MV_Zechstein_Polygon_Diss_Karten
f) Einladen der vorgefilterten Bohrungen („XY-Tabelle in Punkt“)	MV_Salz_gefiltert, Nachlieferung_MV_Salz
g) Entfernen der Bohrungen innerhalb von Salzstöcken („Radieren“) und Sortieren der Bohrungen nach Mächtigkeit Salz unter Entfernung der Bohrungen mit Salz in kleiner als 300 m und größer als 1500 m Tiefe	MV_Bohrungen_gefiltert_ausserhalbSalzstock_groesser_100m, Nachlieferung_MV_Salz_ausserhalbSalzstock_groesser100m
h) Entfernen von Bohrungen, die bei Gebieten liegen, die die Mindestanforderung Salz steil erfüllen	MV_Bohrungen_Salz_groesser100m_flach
i) Vergrößern der Fläche nach Informationen aus Bohrungen, alle Gebiete zu einem zusammenfügen („merge“ und „dissolve“) und in einzelne Features zerschneiden („Trennen“)	MV_Zechstein_Polygon_Diss_Karten_Bohrungen
j) Löschen von zu kleinen Gebieten	
k) Export einer Shape-Datei	MV_Zechstein_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 34 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete 3D-Modell für Mecklenburg-Vorpommern wurde im Rahmen der Standortauswahl durch externe Dienstleister auf Basis des 2D-Kartenwerkes des SPBA erstellt (Doornenbal & Stevenson 2010). Auf Basis von Isolinien wurden Hilfsflächen modelliert, deren Verschneidungen und Durchdringungen entfernt wurden. Aus diesen Hilfsflächen wurden elf Basisflächen modelliert.

- Tertiär (MV_131_t_iso_rev01)
- Oberkreide (MV_140_kro_iso_rev01)
- Unterkreide (MV_150_kru_iso_rev01)
- Oberjura (MV_160_jo_iso_rev01)
- Mitteljura (MV_170_jm_iso_rev01)
- Unterjura (MV_180_ju_iso_rev01)
- Keuper (MV_190_k_iso_rev01)
- Oberer Buntsandstein (MV_201_so_iso_rev01)
- Unterer Buntsandstein (MV_210_su_iso_rev01)
- Zechstein (MV_220_z_iso_rev01)
- Rotliegendesedimente (MV_240_ro_iso_rev01)

Störungen sind im Datensatz des SPBA als Linien ohne Teufenangaben ausgewiesen. Im SPBA-3D wurden diese Störungslinien auf die modellierten Flächen projiziert ohne die Basisflächen zu versetzen.

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 34 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Zechstein wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche Zechstein MV_220_z_iso_rev01 verwendet (Tabelle 34, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Mecklenburg-Vorpommern wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 34, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 34, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 34, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Zechstein und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Unteren und Oberen Buntsandstein, Keuper, Unterjura, Mitteljura, Oberjura, der Unter- sowie Oberkreide, des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 34, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100 m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 34, Nr. 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300-1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 34, Nr. 2h). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten. Vereinzelt werden Bohrungsdaten in Kombination mit 2D-Profilschnitten herangezogen, um zusätzliche Informationen zur Tiefenlage bzw. Lagerung und Mächtigkeit des Wirtsgesteins in der endlagerrelevanten Tiefe zu erhalten.

Die Bearbeitungsfläche Zechstein in flacher Lagerung wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 34, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Das Wirtsgestein Steinsalz umfasst nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell des Untergrundes. Durch die Verwendung von thematischen Karten und Bohrungsdaten werden Gebiete spezifischer ausgewiesen, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Alle verwendeten Informationen (vgl. Tabelle 33) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt (Tabelle 34, Nr. 3). Die aus dem Geomodell des SPBA extrahierten Flächen, die eine Mindestmächtigkeit des Zechstein von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m und 1500 m vorkommen, wurden zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wird (Tabelle 34, Nr. 3a und 3b). Zusätzlich wurden die Verbreitungskarten des Salzes im Zechstein von Franke (2020) importiert, georeferenziert und vektorisiert (Tabelle 34, Nr. 3c). Beim Vergleich der paläogeographischen Karten mit den Modellflächen gab es größere Unterschiede. Die Steinsalzverbreitung der einzelnen Formationen (Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation) der paläogeographischen Karten umfassten das gesamte Landesgebiet von Mecklenburg-Vorpommern. Lediglich der nördliche Teil von Rügen wies laut paläogeographischen Karten keine Steinsalzvorkommen auf. Die Modellflächen hingegen wiesen Zechsteinvorkommen in kleinen Gebieten im Landesinneren auf und in größeren Gebieten im Nordosten von Mecklenburg-Vorpommern und auf Rügen. Dabei lagen Teile der Modellflächen, die auf Rügen ausgewiesen wurden, nicht im Steinsalzverbreitungsbereich von den paläogeographischen Karten. Deswegen wurden die Modellflächen mit der Steinsalzverbreitung der paläogeographischen Karten verschnitten (Tabelle 34, Nr. 3d). Es entstanden Flächen, die Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und in einer Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m aufweisen und die gemäß der Verbreitungskarten Steinsalz aufweisen (Tabelle 34, Nr. 3e).

Um einen Positivbeweis der Flächen durchführen zu können, wurden Bohrungen so weit gefiltert, dass diese Bohrungen Steinsalz im Zechstein in der richtigen Tiefenlage zeigen. Dann wurden die Bohrungen in das ArcGIS Pro-Projekt importiert (Tabelle 34, Nr. 3f) und die Bohrungen nach Mächtigkeiten von Salz sortiert, wobei nur die Bohrungen betrachtet wurden, die außerhalb der ausgewiesenen Salzstöcke der InSpEE-Karte liegen. So entstand eine Shape-Datei, die die Bohrungen mit Salzmächtigkeiten von mehr als 100 m enthält (Tabelle 34, Nr. 3g).

Die aus der Verschneidung der paläogeographischen Karten mit den Modellflächen entstandenen Flächen wurden anhand der Bohrungen überprüft. Lagen Bohrungen mit Salzmächtigkeiten größer als 100 m außerhalb von Flächen mit ausreichender Zechsteinmächtigkeit, wurden diese Flächen um die Bohrungen vergrößert (Tabelle 34, Nr. 3i). Dafür wurden die Bohrungen mit Puffern umgeben, die dem Abstand bis zur nächsten Fläche entsprechen. Diese Puffergebiete wurden der Fläche hinzugefügt. Drei dicht beieinanderliegende Bohrungen im Nordosten des Landes lagen außerhalb der Modellflächen. Diese wurden der nahe liegenden Zechsteinfläche hinzugefügt. Außerdem lagen im Südwesten Mecklenburg-Vorpommerns zwei Bohrungen außerhalb der Modellflächen, wobei keine Modellfläche in der Nähe ausgewiesen wurde. Somit konnten diese Bohrungen keine Flächen zugeordnet werden. Die beiden Bohrungen lagen in unmittelbarer Nähe zu Gebieten, die die Mindestanforderungen für Salz in steiler Lagerung erfüllen, und daher in unmittelbarer Nähe zu einer Salzstruktur. Da diese nicht dem Steinsalz in stratiformer Lagerung zugeordnet werden kann, wurden diese beiden Bohrungen entfernt (Tabelle 34, Nr. 3h). Außerdem wurde ein Abgleich durchgeführt zwischen Flächen, die durch die Verschneidung mit den paläogeographischen Karten weggefallen sind, und der Lage der Bohrungen. Lagen Bohrungen in Gebieten, die durch die Verschneidung eliminiert wurden, sind diese Flächen dennoch wieder in das weitere Verfahren aufgenommen worden, da die Bohrungen eine Salzmächtigkeit von mehr als 100 m anzeigen und die Modellflächen dort Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und richtiger Tiefenlage aufweisen. Dies war in Mecklenburg-Vorpommern nicht der Fall.

Anschließend wurden die neu entstandenen Gebiete hinsichtlich ihrer Fläche überprüft und Gebiete mit einer Fläche von weniger als 3 km² aufgrund der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ gelöscht (Tabelle 34, Nr. 3j). Die verbleibenden Gebiete wurden benannt und anschließend als Shape-Datei exportiert (Tabelle 34, Nr. 3k).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10⁻²¹ m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator

„Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die lithostratigraphischen Einheiten z2NA (Staßfurt-Steinsalz), z3NA (Leine-Steinsalz) und/oder z4NA (Aller-Steinsalz) haben gemäß der Inventarisierungstabelle für Mecklenburg-Vorpommern (siehe Kapitel 5) als Hauptkomponente Steinsalz. Diese Einheiten sind in allen ausgewiesenen Gebieten verbreitet.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für das Wirtsgestein Steinsalz im Zechstein in den verbleibenden Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern **erfüllt** ist.

*Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG*

Die Mächtigkeit des Zechstein wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Zechstein zusammen.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass der Wirtsgesteinshorizont in erforderlicher Mächtigkeit vorliegt.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

*Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG*

Die Tiefenlage des Zechstein wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass der Wirtsgesteinshorizont in erforderlicher Tiefe vorliegt.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 21 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Zechstein in Mecklenburg-Vorpommern dargestellt.

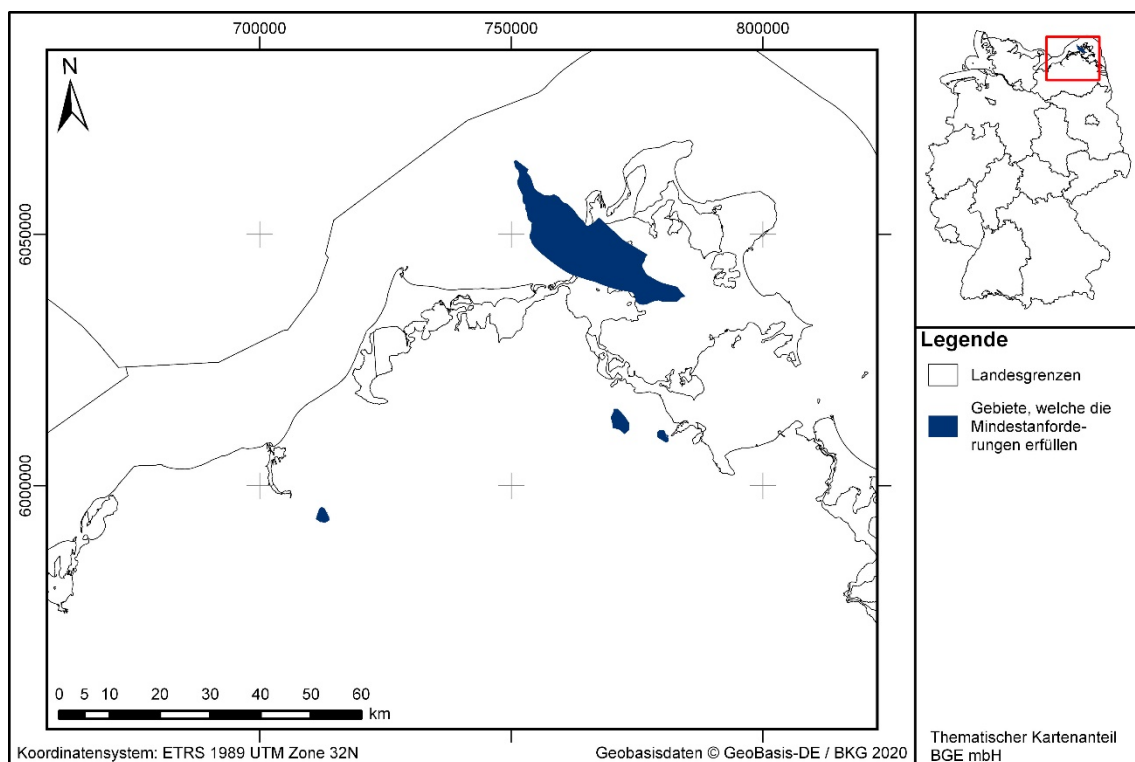


Abbildung 21: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Mecklenburg-Vorpommern

In Abbildung 22 ist ein geologischer Schnitt durch Mecklenburg-Vorpommern dargestellt. Nördlich des Grimmener Walls kreuzt das Profil die verbleibenden Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen.

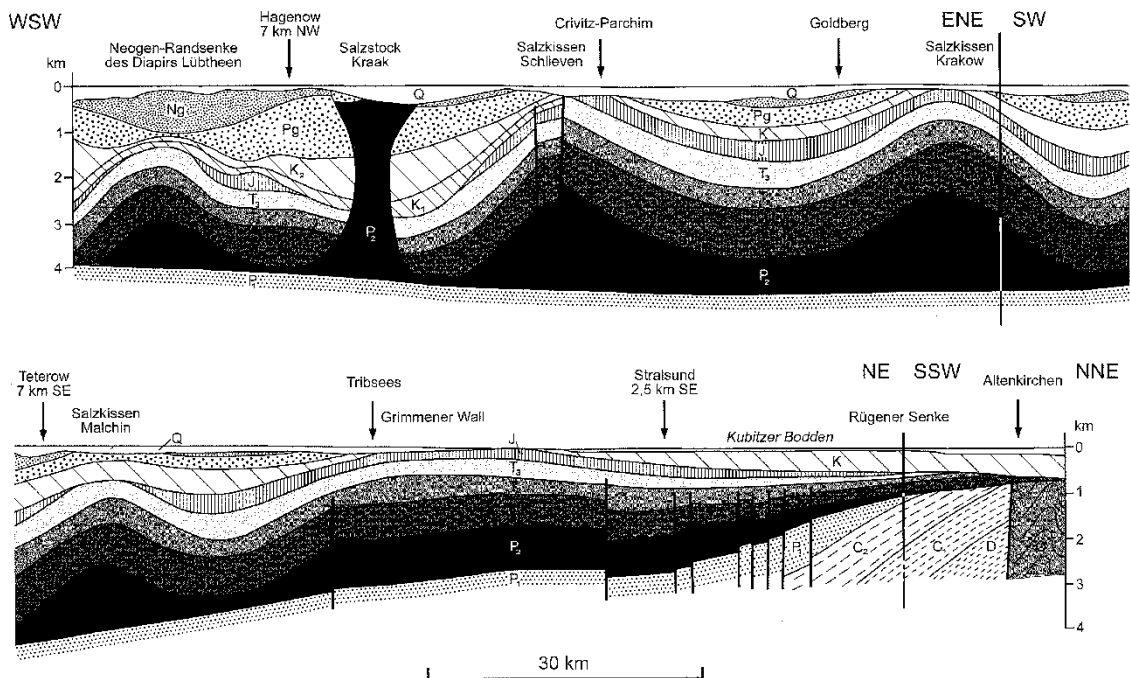


Abbildung 22: Profilschnitt durch das Tafeldeckgebirge durch Mecklenburg-Vorpommern.

O – Ordovizium, D – Devon, C1 – Unterkarbon, C2 – Oberkarbon, P1 – Rotliegendes, P2 – Zechstein, T1 – Buntsandstein, T2 – Muschelkalk, T3 – Keuper, J – Jura, K – Kreide, K1 – Unterkreide, K2 – Oberkreide, Pg – Paläogen, Ng – Neogen, Q – Quartär (Krull 2004)

Eine Auflistung der Gebiete in Mecklenburg-Vorpommern, welche die Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 35 zu finden.

Tabelle 35: Auflistung aller Gebiete in Mecklenburg-Vorpommern, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km²]
MG_s_z_MV_1	6
MG_s_z_MV_2	4
MG_s_z_MV_3	12
MG_s_z_MV_4	318

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 36: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 36: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Grup- pen-ID	Name des Daten- satzes	Entscheidungserhebliches Da- tum der Datei	Beschreibung
11902082	9770	MV_SKUA_Export		SPBA-3D für Meck- lenburg-Vorpom- mern
11888776	9164	LUNG_SVZ_Kurz_ 2020_02_06	Schichtenverzeichnisse der ent- scheidungserheblichen Bohrun- gen sind in Anhang 1 aufgelistet	Bohrdatenbank

Darüber hinaus werden die Verbreitungsgrenzen des Steinsalzes der jeweiligen Forma-
 tion (Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation) folgender thematischer Karten als ent-
 scheidungserheblich eingestuft:

Franke, D. (2020): *Geologie von Ostdeutschland (Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern) - Ein Kompendium*. Glienicke/Nordbahn: Diet-
 rich Franke. Letzte Aktualisierung am: Last updated 12.02.2020. Zugriff am: 01.03.2020.
<http://www.regionalgeologie-ost.de/>

1. Abb. 12: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Staßfurt-Formation (Zech-
 stein 2) in Ostdeutschland
2. Abb. 13: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Leine-Formation (Zechstein
 3) in Ostdeutschland
3. Abb. 14: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Aller-Formation, Ohre-For-
 mation, Friesland-Formation und Fulda-Formation (Zechstein 4-7) in Ostdeutsch-
 land

1.2.4 Zechstein – Niedersachsen, Bremen, Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderung nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Zechstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Niedersachsen. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Zechstein die Salzformationen der Werra-, Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Zechstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Perm, Zechstein, *Werra-Formation*, *Staßfurt-Formation*, *Leine-Formation*, *Aller-Formation*

Der Zechstein (Oberperm) kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Formationen untergliedert werden: Werra-, Staßfurt-, Leine, Aller-, Ohre-, Friesland und Fulda-Formation (z. B. Richter-Bernburg 1955). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Niedersachsen die Werra-, Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Zechstein und deren lithologische Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Niedersachsen (siehe Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen des Zechstein sind im Untergrund von Niedersachsen annähernd flächendeckend vorhanden. Generell liegt mehr als 100 m mächtiges Steinsalz vor, welches jedoch in großen Teilen von Niedersachsen in stratiformer Lagerung nur in Tiefen

größer 1500 m vorkommt. In Tiefen zwischen 300 m und 1500 m u. GOK ist stratiformes Steinsalz hauptsächlich im Süden Niedersachsens und lokal im Westen Niedersachsens vorhanden.

Geologische Beschreibung

Der Zechstein (Oberperm) ist eine lithostratigraphische Einheit, die durch vollmarine Verhältnisse und die Bildung von mächtigen Steinsalzablagerungen geprägt ist (Meschede 2018). Infolge der Zechstein-Transgressionen erfolgte die Füllung des Zentraleuropäischen Beckens. Das Ablagerungsgebiet umfasst in Deutschland das Norddeutsche Becken und zieht sich bis hinein ins Thüringer Becken, das Werra- und Fulda-Gebiet sowie bis nach Nordrhein-Westfalen (Niederrhein). Die Transgressionen fanden in bis zu sieben Zyklen statt (Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland-, Fulda-Formation), die zur Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Gips / Anhydrit und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005b). Dabei sind die Zyklen in den verschiedenen Ablagerungsgebieten durchaus unterschiedlich ausgeprägt.

Das Werra-Steinsalz (z1NA) ist nur lokal in Niedersachsen vorhanden, kann im Westlichen Niedersachsen jedoch Mächtigkeiten von mehr als 200 m erreichen (Heunisch et al. 2017b). Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) weist zusammen mit dem Kaliflöz Staßfurt (z2K) Mächtigkeiten von mehr als 500 m auf. Das Leine-Steinsalz (z3NA) tritt zusammen mit den Kaliflözen Ronnenberg (z3KR_o) und Riedel (z3KR_i) auf und erreicht dabei Mächtigkeiten von ca. 150 m. Das Aller-Steinsalz (z4NA) kommt in Niedersachsen mit einer Mächtigkeit von ungefähr 100 m vor. Das Ohre-Steinsalz (z5NA) der Ohre-Formation weist in Niedersachsen eine Mächtigkeit von ca. 30 m auf. Das Friesland-Steinsalz (z6NA) der Friesland-Formation kommt mit einer Mächtigkeit von ca. 20 m und das Mölln-Steinsalz (z7NA) der Fulda-Formation mit einer Mächtigkeit von etwa 35 m in Niedersachsen vor (u. a. Heunisch et al. 2017b).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 37). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 37: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	NI	LBEG	11842295/777 5	pl/ts	BGE-GTA3D	3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
2	HH	BUE	11880284/843 4	ASCII/ts	Tiefenmodell Hamburg	3D-Modell von Hamburg mit 2 Basis- und 1 Topfläche
3	DE	BKG	11875056/772 8	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
4	DE	BKG	11865482/885 3	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
5	DE	BGR	11844870_01/ 6821	pdf	BGR_Salzkarte_Begleitinformationen.pdf & BGR_Salzkarte_BlattA_150dpi.pdf	Übersichtskarte zur Salzverbreitung mit Informationen
6	DE	BGR	11844870_01/ 6817	mpk	Zechstein_salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
7	NI	LBEG	11881514/910 5	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 1. Teil	Bohrdatenbank
8	NI	LBEG	11881514/910 5	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 2. Teil	Bohrdatenbank
9	DE	BGR		pdf	InSpEE-Bericht	PDF-Bericht zum InSpEE-Projekt (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
10	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturumrisse_500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
11	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturumrisse_1000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
12	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturumrisse_1500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesen-berg 2016; Pollok et al. 2016)
13	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturumrisse_2000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesen-berg 2016; Pollok et al. 2016)

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 37 genannten Eingangsdaten wurden folgende thematische Karten zur weiteren Bearbeitung verwendet:

NIBIS-Kartenserver (Niedersächsisches Bodeninformationssystem),
<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>

1. 3D-Modelle, Geotektonischer Atlas 3D: Karte mit dem Umriss des GTA3Ds, um die Abdeckung des 3D-Modells in Niedersachsen zu ermitteln

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Zechstein in Niedersachsen geprüft wurde, ist in Tabelle 38 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 38: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Zechstein aus der Basisfläche Zechstein 16_z (aus allen Kacheln)	b_Zechstein_NI.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit < 100 m löschen	b_Zechstein_NI_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Zechstein_NI_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_z_NI.dxf MG_s_z_NI.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Polygon-Featureclass der DXF-Fläche in 2D-Polygon umwandeln	NI_Zechstein_Polygon,
b) Dissolve des 2D-Polygons	NI_Zechstein_Polygon_Diss
c) Einladen, Konvertieren, Dissolven und Bearbeiten der Salzstrukturen	Salzstrukturen_NI
d) Einladen der IG Salz steil	IG_d_DE
e) Entfernen („radieren“) der Salzstrukturen aus Salz flach	NI_Zechstein_Polygon_Diss_flach
f) Einladen der Paläogeographischen Karte (BASAL)	BASAL_Zechstein
g) Salzvorkommen Zechstein mit Modellfläche verschneiden („Überschneiden“)	NI_Zechstein_Polygon_Diss_flach_BASAL

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
h) Umriss von GTA3D importieren, georeferenzieren und Gebiete ohne GTA3D in NI vektorisieren	GTA3D_NI
i) Gebiete ohne GTA3D mit BASAL-Karte verschneiden („überschneiden“)	GTA3D_NI_BASAL
j) Zusammenführen („merge“) beider Features (GTA3D_NI_BASAL, NI_SH_Zechstein_Polygon_Diss_flach_BASAL)	NI_Zechstein_Polygon_Diss_flach_BASAL_GTA3D
k) Nochmaliges Eliminieren von Salzstrukturen („radieren“)	NI_Zechstein_Polygon_Diss_flach_BASAL_GTA3D_flach
l) Eliminieren („radieren“) der IG Salz steil aus Modellfläche	NI_Zechstein_Polygon_Diss_flach_BASAL_GTA3D_flach_ges
m) Einladen der vorgefilterten Bohrungen („XY-Tabelle in Punkt“)	NI_Auswahl_Bohrungen
n) Eliminieren („Punkt radieren“) der Bohrungen, die in Salzstrukturen liegen	NI_Bohrungen_flach
o) Sortieren der Bohrungen nach Mächtigkeit Salz unter Entfernung der Bohrungen mit Salz in kleiner als 300 m und größer als 1500 m Tiefe, außerhalb der 12-Seemeilen-Zone	NI_Bohrungen_Zechstein_Salz_groesser100m
p) Bohrungen mit mehr als 100 m Salz in der Nähe von IG Salz steil oder Salzstruktur manuell entfernen	NI_Bohrungen_Zechstein_Salz_groesser100m_relevant
q) Vergrößern der Fläche nach Informationen aus Bohrungen, alle Gebiete zu einem zusammenfügen („merge“ und „dissolve“) und in einzelne Features zerschneiden („Trennen“)	NI_Zechstein_Polygon_Diss_flach_BASAL_GTA3D_flach_ges_Bohrungen
r) Löschen von zu kleinen Gebieten	
s) Export einer Shape-Datei	NI_Zechstein_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 38 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D; Bombien et al. 2012) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell ist die digitale Umsetzung des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldschuhn 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = Digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tpl = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg sowie weite Teile von Niedersachsen bis auf den südlichen Bereich ab Höhe Göttingen ab. Die Flächen des GTA3D sind in 42 Kacheln untergliedert.

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 38 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen kachelweise vor, daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Zechstein-Basisflächen (16_z) erzeugt (Tabelle 38, Nr. 2b). Allerdings sind an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermaschung) offenkundig.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 13, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 38, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 38, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Zechstein und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Unteren und Mittleren Buntsandstein, Röt und Muschelkalk, Keuper, Lias, Dogger, Oberjura und Wealden, der Unter- sowie Oberkreide, des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 38, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 38, Nr. 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300-1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 38, Nr. 2h). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten. Vereinzelt werden Bohrungsdaten in Kombination mit 2D-Profilschnitten herangezogen, um zusätzliche Informationen zur Tiefenlage bzw. Lagerung und Mächtigkeit des Wirtsgesteins in der endlagerrelevanten Tiefe zu erhalten.

Die Bearbeitungsfläche Zechstein in flacher Lagerung wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 38, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Das Wirtsgestein Steinsalz umfasst nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im GTA3D. Durch die Verwendung von thematischen Karten und Bohrungsdaten wurden Gebiete spezifischer ausgewiesen, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Alle verwendeten Informationen (vgl. Tabelle 37) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt (Tabelle 38, Nr. 3). Die aus dem Geomodel extrahierten Flächen für Niedersachsen, die eine Mindestmächtigkeit des Zechstein von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m und 1500 m vorkommen, wurden zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wird (Tabelle 38, Nr. 3a und 3b). Zusätzlich wurden die aus den Modellen bekannten Salzstrukturen in das Projekt eingeladen und so weit aufbereitet, dass diese aus den Flächen mit dem flach gelagerten Zechstein herausgeschnitten werden können, da es dort zum Teil Überschneidungen gab (Tabelle 38, Nr. 3c und 3e). Weiterhin wurden die identifizierten Gebiete von Salz in steiler Lagerung importiert (Tabelle 38, Nr. 3d).

Anschließend wurde die Verbreitungskarte des Salzes im Zechstein aus dem BASAL-Bericht, die die Verbreitung des Zechsteinsalzes und nicht der einzelnen Zyklen enthält, importiert, um die Information der Zechsteinverbreitung aus den 3D-Modellen mit der Verbreitungskarte zu verschneiden (Tabelle 38, Nr. 3f und 3g). Es entstanden Flächen, die Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und in einer Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m aufweisen und die gemäß der Verbreitungskarte Steinsalz aufweisen.

Die Modellflächen stammen aus dem GTA3D-Modell. Dieses ist jedoch nicht in ganz Niedersachsen vorhanden, sodass es sich bei Niedersachsen um Fall 2B handelt. Im südlichen Bereich von Niedersachsen liegen keine Informationen aus dem GTA3D vor. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um den Harz und einen Bereich von nördlich Göttingen bis zur südlichen Grenze Niedersachsen. Zusätzlich ist im Nordosten von Niedersachsen der GTA3D nicht vorhanden. Dies betrifft einen Bereich in der Höhe von Lüneburg an der Grenze zu Mecklenburg-Vorpommern. Da hier keine Informationen aus den Modellen vorliegen, die BASAL-Karte aber Zechsteinsalze ausweist, werden diese Gebiete mit in die weitere Bearbeitung integriert und in den Datensatz aufgenommen, indem die Umrisse des GTA3D als Karte vom NIBIS-Kartenserver in das ArcGIS Pro-Projekt importiert, georeferenziert und vektorisiert wurden (Tabelle 38, Nr. 3h). Außerdem ist im südlichen Niedersachsen eine Bohrung außerhalb der Modellflächen aus dem GTA3D vorhanden, die Leine-Steinsalz in ausreichender Mächtigkeit und vorgeschriebener Tiefenlage aufweist. Auch bei einem Abgleich mit den Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, von Hessen aus dem Zechsteinsalz in stratiformer Lagerung gibt es sehr gute Übereinstimmungen.

Da in der neu entstandenen Fläche (Tabelle 38, Nr. 3i und 3j) Salzstrukturen vorhanden waren, wurden diese nochmals aus dem Datensatz eliminiert (Tabelle 38, Nr. 3k). Weiterhin wurden die identifizierten Gebiete von Salz in steiler Lagerung aus der Fläche entfernt, um mögliche Überschneidungen zu vermeiden (Tabelle 38, Nr. 3l).

Um einen Positivbeweis der Flächen durchführen zu können, wurden Bohrungen so weit gefiltert, dass diese Bohrungen Steinsalz im Zechstein in der richtigen Tiefenlage zeigen. Dann wurden die Bohrungen in das ArcGIS Pro-Projekt importiert (Tabelle 38, Nr. 3m). Die Bohrungen, die innerhalb der Salzstrukturen lagen, wurden entfernt und nicht weiter

betrachtet (Tabelle 38, Nr. 3n). Anschließend wurden die Bohrungen nach Mächtigkeiten von Salz sortiert. So entstand eine Shape-Datei, die die Bohrungen mit Salzmächtigkeiten von mehr als 100 m enthält (Tabelle 38, Nr. 3o).

Die aus der Verschneidung der paläogeographischen Karte mit den Modellflächen entstandenen Flächen wurden anhand der Bohrungen überprüft. Bohrungen mit Salzmächtigkeiten größer als 100 m, die außerhalb von Flächen mit ausreichender Zechsteinmächtigkeit lagen, wurden nochmals gesondert geprüft. Bei den Bohrungen, die Steinsalz in Tiefen zwischen 0 m und einigen tausend Metern zeigten ohne eine weitere Differenzierung, handelte es sich um abgelenkte Bohrungen. Dort wurden die Schichtenverzeichnisse der Stammborungen betrachtet, in denen die geologischen Einheiten detaillierter aufgezeichnet wurden. Anhand dieser Schichtenverzeichnisse wurde dann eine Zuordnung durchgeführt. Die Stammborungen aller dieser Bohrungen zeigten Steinsalz des Zechstein in Tiefen größer 1500 m. Deswegen wurden diese Bohrungen aus dem Verfahren genommen. Zusätzlich wurden die Bohrungen, die außerhalb der 12-Seemeilen-Zone abgeteuft wurden, eliminiert. Weiterhin gab es Bohrungen, die außerhalb der ausgewiesenen Modellflächen lagen und eine solche auch nicht in direkter Nähe zeigten und somit keiner Fläche zugeordnet werden konnten. Der Großteil dieser Bohrungen lag jedoch in unmittelbarer Nähe zu einem identifizierten Gebiet von Salz in steiler Lagerung und somit zu einer Salzstruktur. Somit konnten diese Bohrungen nicht dem Steinsalz in stratiformer Lagerung zugeordnet werden, sodass diese Bohrungen entfernt wurden. Eine weitere Bohrung lag direkt neben einer Salzstruktur, die jedoch nicht zu einem identifizierten Gebiet für Salz in steiler Lagerung geworden ist. Bei dieser Bohrung handelte es sich um eine abgelenkte Bohrung, die somit kein Steinsalz in stratiformer Lagerung zeigt. Eine weitere Bohrung lag wiederum dicht neben einer Salzstruktur aus dem Geomodell und innerhalb eines Salzstocks aus der InSpEE-Karte, sodass auch diese Bohrung entfernt wurde (Tabelle 38, Nr. 3p).

Es gab eine weitere Bohrung, die außerhalb der Modellfläche lag, jedoch in unmittelbarer Umgebung zur nächsten Fläche. Diese Fläche wurde um die Bohrung vergrößert (Tabelle 38, Nr. 3q). Dafür wurde die Bohrung mit einem Puffer umgeben, der dem Abstand bis zur nächsten Fläche entspricht. Dieses Puffergebiet wurde der Fläche hinzugefügt.

Außerdem wurde ein Abgleich durchgeführt zwischen Flächen, die durch die Verschneidung mit der paläogeographischen Karte weggefallen sind, und der Lage der Bohrungen. Lagen Bohrungen in Gebieten, die durch die Verschneidung eliminiert wurden, sind diese Flächen dennoch wieder in das weitere Verfahren aufgenommen worden, da die Bohrungen eine Salzmächtigkeit von mehr als 100 m anzeigen und die Modellflächen dort Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und richtiger Tiefenlage aufweisen. Dies war nicht der Fall.

Anschließend wurden die neu entstandenen Gebiete hinsichtlich ihrer Fläche überprüft und Gebiete mit einer Fläche von weniger als 3 km² aufgrund der Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ gelöscht (Tabelle 38, Nr. 3r). Die verbleibenden Gebiete wurden benannt und anschließend als Shape-Datei exportiert (Tabelle 38, Nr. 3s).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die lithostratigraphischen Einheiten z1NA (Werra-Steinsalz), z2NA (Staßfurt-Steinsalz), z3NA (Leine-Steinsalz) und z4NA (Aller-Steinsalz) haben gemäß der Inventarisierungstabelle für Niedersachsen (siehe Kapitel 5) als Hauptkomponente Steinsalz. Diese Einheit ist in allen ausgewiesenen Gebieten verbreitet.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für das Wirtsgestein Steinsalz im Zechstein in den verbleibenden Gebieten in Niedersachsen **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Die Mächtigkeit des Zechstein wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Zechstein zusammen. Über mehrere Bohrungen (vgl. Anhang) sind innerhalb und außerhalb der Modellflächen Steinsalzmächtigkeiten von größer gleich 100 m nachgewiesen.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Die Tiefenlage des Zechstein wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde. Über mehrere Bohrungen (vgl. Anhang) ist innerhalb und außerhalb der Modellflächen eine Teufenlage des Zechstein-Salinars zwischen 300 m und 1500 m unter GOK nachgewiesen.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 23 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Zechstein in Niedersachsen dargestellt.

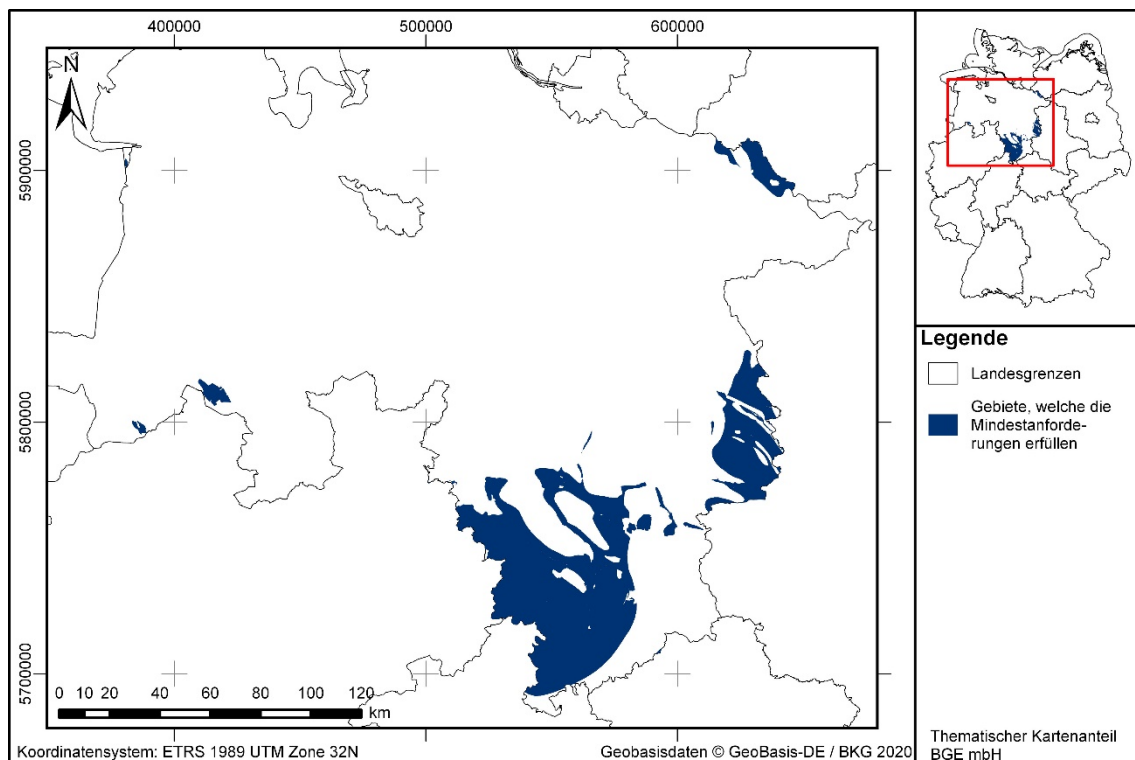


Abbildung 23: *Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Niedersachsen, Bremen und Hamburg*

In Abbildung 24 ist ein Profilschnitt durch die Elm- und Lappwald-Helmstedt-Scholle zu sehen, der unter anderem das Zechstein-Salinar in stratiformer Lagerung im östlichen Niedersachsen darstellt.

Eine Auflistung der Gebiete in Niedersachsen, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 39 zu finden.

Tabelle 39: Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_NI_1	0,06
MG_s_z_NI_2	2
MG_s_z_NI_3	10
MG_s_z_NI_4	10
MG_s_z_NI_5	30
MG_s_z_NI_6	25
MG_s_z_NI_7	0,03
MG_s_z_NI_8	28
MG_s_z_NI_9	14
MG_s_z_NI_10	0,003
MG_s_z_NI_11	0,06
MG_s_z_NI_12	0,03
MG_s_z_NI_13	0,2
MG_s_z_NI_14	0,05
MG_s_z_NI_15	2
MG_s_z_NI_16	3200
MG_s_z_NI_17	2
MG_s_z_NI_18	5
MG_s_z_NI_19	1
MG_s_z_NI_20	1
MG_s_z_NI_21	5
MG_s_z_NI_22	0,3
MG_s_z_NI_23	0,4
MG_s_z_NI_24	4
MG_s_z_NI_25	16
MG_s_z_NI_26	16
MG_s_z_NI_27	614
MG_s_z_NI_28	65

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_NI_29	221
MG_s_z_NI_30	3
MG_s_z_NI_31	173
MG_s_z_NI_32	35

Die Flächen, die kleiner als 3 km² sind, liegen an der Landesgrenze von Niedersachsen und gehen evtl. ins Nachbarland weiter. Deswegen wurden diese hier nicht aussortiert.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 40 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 40: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11842295	7775	BGE-GTA3D		3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
11881514	9105	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 2. Teil	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgelistet	Bohrdatenbank
11844870_01	6817	Zechstein_salinar	Verbreitungsgrenze	Die Verbreitungsgrenze des Zechstein-Salinars wurde als Bewertungsgrundlage herangezogen

1.2.5 Zechstein – Nordrhein-Westfalen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Zechstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Nordrhein-Westfalen. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Zechstein die Salzformationen der Werra- und Leine-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Zechstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Nordrhein-Westfalen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Perm, Zechstein, *Werra-Formation*, *Leine-Formation*

Der Zechstein (Oberperm) kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Formationen untergliedert werden: Werra-, Staßfurt-, Leine, Aller-, Ohre-, Friesland und Fulda-Formation (z. B. Richter-Bernburg 1955). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Nordrhein-Westfalen die Werra- und Leine-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Zechstein und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Nordrhein-Westfalen (siehe Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen des Zechstein sind im Untergrund von Nordrhein-Westfalen verbreitet. Sie kommen im Niederrheinischen Becken sowie im Nordosten Nordrhein-Westfalens an der Grenze zu Niedersachsen und Hessen vor.

Geologische Beschreibung

Der Zechstein (Oberperm) ist eine lithostratigraphische Einheit, die durch vollmarine Verhältnisse und die Bildung von mächtigen Steinsalzablagerungen geprägt ist (Meschede 2018). Infolge der Zechstein-Transgressionen erfolgte die Füllung des Zentraleuropäischen Beckens. Das Ablagerungsgebiet umfasst in Deutschland das Norddeutsche Becken und zieht sich bis hinein ins Thüringer Becken, das Werra- und Fulda-Gebiet sowie bis nach Nordrhein-Westfalen (Niederrhein). Die Transgressionen fanden in bis zu sieben Zyklen statt (Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland-, Fulda-Formation), die zur Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Gips / Anhydrit und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005b). Dabei sind die Zyklen in den verschiedenen Ablagerungsgebieten durchaus unterschiedlich ausgeprägt.

Das Werra-Steinsalz (z1NA) liegt als bis zu 200 m mächtiges Steinsalz im Niederrhein-Gebiet vor. Im Beckenzentrum (zwischen Winterswijk, Moers, Uedem) kommen auch Kalisalze vor (Grabert 1998a).

Das Leine-Steinsalz (z3NA) besteht aus einem 105 m bis 181 m mächtigem Steinsalz, das z. T anhydritisch ist und salinare Kalisalze enthält. Es kommt im Nordosten Nordrhein-Westfalens im Bereich Münsterland, Weser- und Osnabrücker Bergland vor. Im Niederrhein-Gebiet ist es nicht vertreten (Grabert 1998a).

Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) kommt im Niederrhein-Gebiet mit bis zu 50 m mächtigem Steinsalz vor, wobei im Norden und Süden des Niederrheins kein Salz angetroffen werden kann, und im Münsterland sowie Weser- und Osnabrücker Bergland ist es oft nicht vorhanden. Das Staßfurt-Steinsalz ist in Nordrhein-Westfalen als potentielles Wirtsgestein zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle nicht mächtig genug.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 41). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 41: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/7 728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/8 853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_t ol10	Digitales-Gelände- Modell

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
3	NW	GD NRW	11883267/8 849	ts	Landesmodell_NRW	3D-Landesmodell von NRW (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2020)
4	NW	GD NRW	11842255/7 541	shp	Zechstein_Verbreitung	Verbreitung der Unterkreide
5	NW	GD NRW	11842255/7 542	shp	Zechstein_b	Isolinien der Basisfläche Unterkreide
6	NW	GD NRW	11842255/7 543	shp	Zechstein_t	Isolinien der Topfläche Unterkreide
7	NW	GD NRW	11883267_ 02/8852	mdb	Bohrung_NRW	Bohrdatenbank, Schichtenverzeichnisse
8	DE	BGR	11844870_ 01/6817	mpk	Zechstein_salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 41 genannten Eingangsdaten wurde folgende thematische Karte verwendet:

Grabert (1998): *Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen: mit 11 Tabellen*. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3510651871, Abbildung 50.

1. Die Niederrheinische Salzpflanze des Zechsteins (Oberperm)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Zechstein in Nordrhein-Westfalen geprüft wurde, ist in Tabelle 42 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 42: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Zechstein aus der Basisfläche Zechstein	b_Zechstein_NW.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Zechstein_NW_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	b_Zechstein_NW_MACRORESULT_AK.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Zechstein_NW_MACRORESULT_AK_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_z_NW.dxf MG_s_z_NW.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Polygon-Featureclass der DXF-Fläche in 2D-Polygon umwandeln	NW_Zechstein_Polygon
b) Dissolve des 2D-Polygons	NW_Zechstein_Polygon_Diss
c) Georeferenzieren und Vektorisieren der Salzvorkommen aus den Paläogeographischen Karten (BASAL, Grabert)	BASAL_Zechstein, NiederrheinischeSalzpanne_Zechstein

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Salzvorkommen Zechstein BASAL mit Modellfläche verschneiden („Überschneiden“)	NW_Zechstein_Polygon_Diss_BASAL
e) Einladen der Bohrungen („XY-Tabelle in Punkt“)	NW_Bohrungen
f) Filtern der Bohrungen nach Zechstein	NW_Bohrungen_Zechstein
g) Filtern der Bohrungen nach Steinsalz als ersten oder zweiten Hauptbestandteil	NW_Bohrungen_Zechstein_Salz
h) Sortieren der Bohrungen nach Mächtigkeit Salz unter Entfernung der Bohrungen mit Salz in kleiner als 300 m und größer als 1500 m Tiefe	NW_Bohrungen_Zechstein_Salz_groesser100m
i) Entfernen von nicht entscheidungserheblichen Bohrungen in Ausschlussbereichen und in zu kleinen Gebieten	NW_Bohrungen_Zechstein_Salz_groesser100m_relevant
j) Vergrößern der Fläche nach Informationen aus Bohrungen, alle Gebiete zu einem zusammenfügen („merge“ und „dissolve“) und in einzelne Features zerschneiden („Trennen“)	NW_Zechstein_Polygon_Diss_BASAL_Bohrungen
k) Löschen von zu kleinen Gebieten	
l) Export einer Shape-Datei	NW_Zechstein_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 42 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell NRW ist ein Übersichtsmodell, dessen Grundlage häufig auf Ergebnissen aus unterschiedlichen Projekten beruht, deren Ergebnisflächen untereinander nicht konsistent abgestimmt wurden. Datenbasis und somit die Genauigkeit sind regional sehr unterschiedlich. Die Basisflächen „Karbon Basis“, „Mitteldevon Basis“ sowie die Einheiten „Emscher Formation“ und „Wealden Formation“ wurden nicht vollständig modelliert und sind lediglich angenäherte Darstellungen, um eine ungefähre Vorstellung von Tiefenlage und Mächtigkeit zu vermitteln.

Das Landesmodell weist eine Top- und elf Basisflächen für stratigraphische Einheiten sowie jeweils eine Top- und Basisfläche für Formationen auf:

- gg_q_b (Quartär Basis)

- gg_t_b (Tertiär Basis)
- gg_kroha_b (Halterner Sande Basis)
- gg_kro_b (Oberkreide Basis)
- gg_kr_b (Kreide Basis)
- gg_j_b (Jura Basis)
- gg_tr_b (Trias Basis)
- gg_z_b (Zechstein Basis)
- gg_r_b (Rotliegend Basis)
- gg_praep_t (Präperm Top)
- gg_c_b (Karbon Basis, unvollständig)
- gg_dm_b (Mitteldevon Basis, unvollständig)

Formationen:

- Emscher_Form_t (Emscher Formation Top, unvollständig)
- Emscher_Form_b (Emscher Formation Basis, unvollständig)
- Wealden_t (Wealden Top, unvollständig)
- Wealden_b (Wealden Basis, unvollständig)

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 42 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Zechstein wurde aus dem Landesmodell die Fläche „Zechstein Basis (gg_z_b)“ verwendet (Tabelle 42, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Nordrhein-Westfalen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 42, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 42, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 42, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Zechstein und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen der Emscher-Formation, der Oberkreide sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 42, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft

„Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 42, Nr. 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300-1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 42, Nr. 2h). Des Weiteren wurde die Plausibilität der Bearbeitungsfläche Zechstein anhand von 2D-Profileschnitte kontrolliert. Die Bearbeitungsfläche Zechstein wurde mit der Verwaltungsgrenze VG250 verschnitten und auf Bereiche innerhalb Nordrhein-Westfalens beschränkt.

Die Bearbeitungsfläche Zechstein wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 42, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Das Wirtsgestein Steinsalz umfasst nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im Landesmodell von Nordrhein-Westfalen. Durch die Verwendung von thematischen Karten und Bohrungsdaten wurden Gebiete spezifischer ausgewiesen, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Alle verwendeten Informationen (vgl. Tabelle 41) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt (Tabelle 42, Nr. 3). Die aus dem Geomodell extrahierten Flächen, die eine Mindestmächtigkeit des Zechsteins von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m und 1500 m vorkommen, wurden zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wird (Tabelle 42, Nr. 3a und 3b). Zusätzlich wurden die Verbreitungskarten des Salzes im Zechstein aus dem BASAL-Bericht sowie von Grabert (1998a) importiert sowie die Karte von Grabert (1998a) georeferenziert und vektorisiert (Tabelle 42, Nr. 3c). Die Karte von Grabert (1998a) zeigte nur den Bereich der Niederrheinischen Salzpflanze und nicht die gesamte Zechsteinverbreitung Nordrhein-Westfalens. Das ausgewiesenen Salzvorkommen in der Niederrheinischen Salzpflanze ist komplett von der BASAL-Karte abgedeckt, weshalb zur weiteren Bearbeitung nur die BASAL-Karte genutzt wurde. Beim Vergleich der paläogeographischen Karte mit den Modellflächen gab es größere Unterschiede. Die Modellflächen wiesen eine sehr viel größere Ausbreitung auf, da die Modellflächen die gesamte Zechsteinverbreitung zeigen, die paläogeographische Karte beschränkt sich dagegen auf die Steinsalzverbreitung. Deswegen wurden die Modellflächen mit der Steinsalzverbreitung aus der paläogeographischen Karte verschnitten (Tabelle 42, Nr. 3d). Es entstanden Flächen, die Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und in einer Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m aufweisen und die gemäß der Verbreitungskarte Steinsalz aufweisen.

Um einen Positivbeweis der Flächen durchführen zu können, wurden die Bohrungen in das ArcGIS Pro-Projekt importiert (Tabelle 42, Nr. 3e) und in ArcGIS Pro so weit gefiltert,

dass diese Bohrungen Steinsalz (HBS1=HY oder HBS2=HY) im Zechstein (CHRSTRAT=PZ) in der richtigen Tiefenlage zeigen (Tabelle 42, Nr. 3f und 3g). Dann wurden die Bohrungen nach Mächtigkeiten von Salz sortiert. So entstand eine Shape-Datei, die die Bohrungen mit Salzmächtigkeiten von mehr als 100 m enthält (Tabelle 42, Nr. 3h).

Die aus der Verschneidung der paläogeographischen Karte mit den Modellflächen entstandenen Flächen wurden anhand der Bohrungen überprüft. Es gab Bohrungen, die innerhalb des Ausschlussbereiches von Aktiven Störungszonen lagen. Da im direkten Umfeld dieser Bohrungen weitere Bohrungen mit Salzmächtigkeiten von mehr als 100 m lagen, die innerhalb der Modellflächen abgeteuft wurden, wurden die Bohrungen innerhalb des Ausschlussbereiches als nicht entscheidungserheblich eingestuft und es fand keine weitere Bearbeitung statt (Tabelle 42, Nr. 3i). Lagen Bohrungen mit Salzmächtigkeiten größer als 100 m außerhalb von Flächen mit ausreichender Zechsteinmächtigkeit und außerhalb des Ausschlussbereiches der Aktiven Störungszonen wurden diese Flächen um die Bohrungen vergrößert (Tabelle 42, Nr. 3j). Dafür wurden die Bohrungen mit Puffern umgeben, die dem Abstand bis zur nächsten Fläche entsprechen. Diese Puffergebiete wurden der Fläche hinzugefügt. Außerdem wurde ein Abgleich durchgeführt zwischen Flächen, die durch die Verschneidung mit den paläogeographischen Karten weggefallen sind, und der Lage der Bohrungen. Lagen Bohrungen in Gebieten, die durch die Verschneidung eliminiert wurden, sind diese Flächen dennoch wieder in das weitere Verfahren aufgenommen worden, da die Bohrungen eine Salzmächtigkeit von mehr als 100 m anzeigen und die Modellflächen dort Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und richtiger Tiefenlage aufweisen. Dies war bei einer Bohrung der Fall, sodass die Modellfläche wieder aufgenommen wurde. Die anderen relevanten Bohrungen lagen alle innerhalb der aus dem Modell extrahierten Flächen und den Verbreitungskarten, sodass hier keine Erweiterung erfolgen musste.

Anschließend wurden die Gebiete hinsichtlich ihrer Fläche überprüft und Gebiete mit einer Fläche von weniger als 3 km³ aufgrund der Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ gelöscht (Tabelle 42, Nr. 3k). Die verbleibenden Gebiete wurden benannt und anschließend als Shape-Datei exportiert (Tabelle 42, Nr. 3l).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10⁻²¹ m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10⁻¹² m/s und weniger.

Die lithostratigraphischen Einheiten z1NA (Werra-Steinsalz) und z3NA (Leine-Steinsalz) haben gemäß der Inventarisierungstabelle für Nordrhein-Westfalen (siehe Kapitel 5) als Hauptkomponente Steinsalz. Diese Einheiten sind in allen ausgewiesenen Gebieten verbreitet.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für das Wirtsgestein Steinsalz im Zechstein in den verbleibenden Gebieten in Nordrhein-Westfalen **erfüllt** ist.

*Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG*

Die Mächtigkeit des Zechstein wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit Zechstein zusammen.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass der Wirtsgesteinshorizont in erforderlicher Mächtigkeit vorliegt.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

*Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG*

Die Tiefenlage des Zechstein wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass der Wirtsgesteinshorizont in erforderlicher Tiefe vorliegt.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 25 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Zechstein in Nordrhein-Westfalen dargestellt.

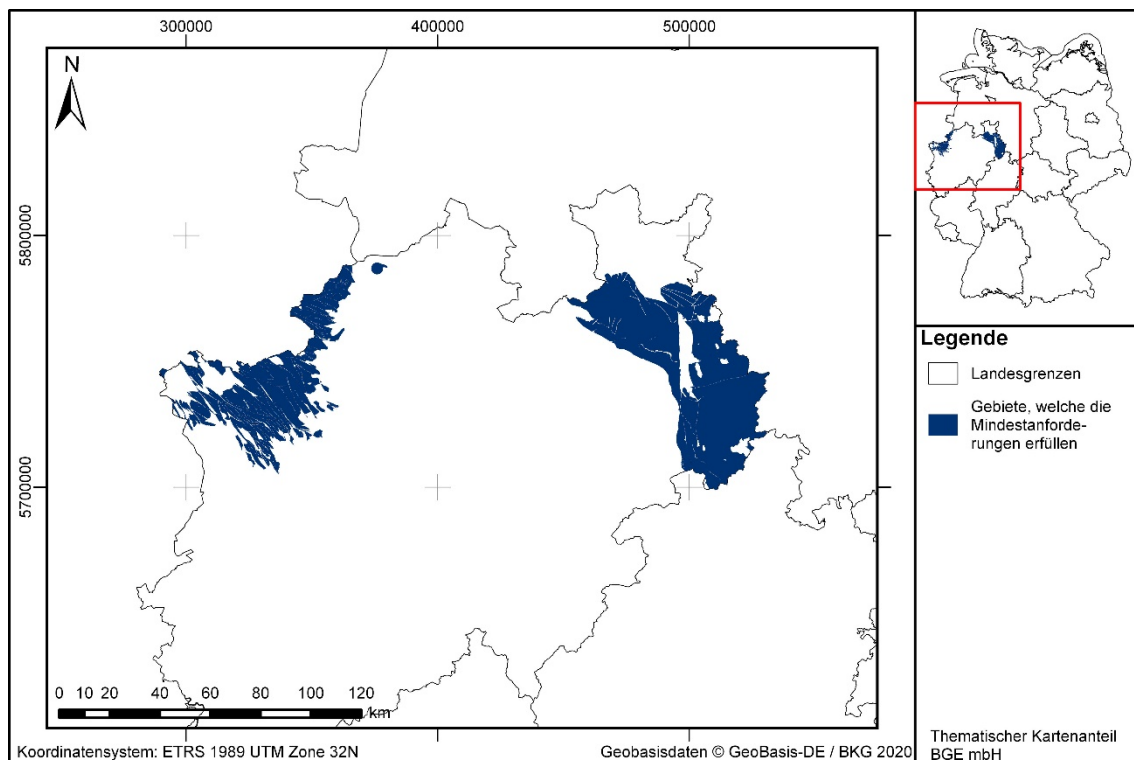


Abbildung 25: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Nordrhein-Westfalen

In Abbildung 26 ist ein Querprofil durch das Niederrheinische Becken dargestellt.

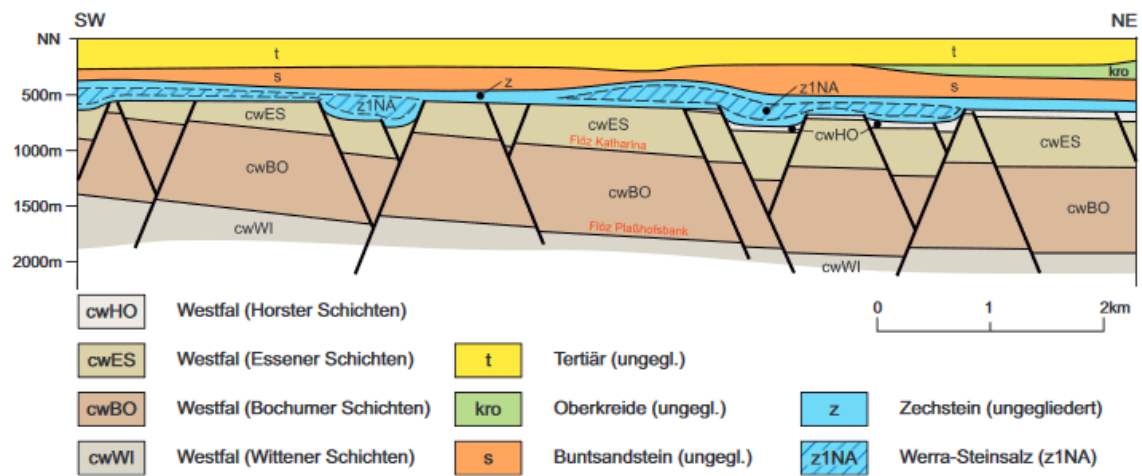


Abbildung 26: Profilschnitt durch das Niederrhein-Becken (Reinhold et al. 2014)

Eine Auflistung der Gebiete in Nordrhein-Westfalen, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 43 zu finden.

Tabelle 43: Auflistung aller Gebiete in Nordrhein-Westfalen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_NW_1	0,1
MG_s_z_NW_2	7
MG_s_z_NW_3	7
MG_s_z_NW_4	5
MG_s_z_NW_5	5
MG_s_z_NW_6	11
MG_s_z_NW_7	7
MG_s_z_NW_8	6
MG_s_z_NW_9	41
MG_s_z_NW_10	5
MG_s_z_NW_11	8
MG_s_z_NW_12	5
MG_s_z_NW_13	9
MG_s_z_NW_14	10
MG_s_z_NW_15	11
MG_s_z_NW_16	13

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_NW_17	7
MG_s_z_NW_18	8
MG_s_z_NW_19	24
MG_s_z_NW_20	11
MG_s_z_NW_21	28
MG_s_z_NW_22	12
MG_s_z_NW_23	16
MG_s_z_NW_24	8
MG_s_z_NW_25	8
MG_s_z_NW_26	3
MG_s_z_NW_27	8
MG_s_z_NW_28	6
MG_s_z_NW_29	4
MG_s_z_NW_30	5
MG_s_z_NW_31	11
MG_s_z_NW_32	5
MG_s_z_NW_33	8
MG_s_z_NW_34	5
MG_s_z_NW_35	11
MG_s_z_NW_36	31
MG_s_z_NW_37	22
MG_s_z_NW_38	11
MG_s_z_NW_39	46
MG_s_z_NW_40	24
MG_s_z_NW_41	33
MG_s_z_NW_42	28
MG_s_z_NW_43	31
MG_s_z_NW_44	5
MG_s_z_NW_45	116
MG_s_z_NW_46	6
MG_s_z_NW_47	5

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_NW_48	11
MG_s_z_NW_49	4
MG_s_z_NW_50	4
MG_s_z_NW_51	18
MG_s_z_NW_52	339
MG_s_z_NW_53	3
MG_s_z_NW_54	7
MG_s_z_NW_55	8
MG_s_z_NW_56	70
MG_s_z_NW_57	15
MG_s_z_NW_58	8
MG_s_z_NW_59	137
MG_s_z_NW_60	10
MG_s_z_NW_61	27
MG_s_z_NW_62	6
MG_s_z_NW_63	6
MG_s_z_NW_64	58
MG_s_z_NW_65	52
MG_s_z_NW_66	6
MG_s_z_NW_67	21
MG_s_z_NW_68	474
MG_s_z_NW_69	5
MG_s_z_NW_70	16
MG_s_z_NW_71	57
MG_s_z_NW_72	19
MG_s_z_NW_73	38
MG_s_z_NW_74	2073
MG_s_z_NW_75	156
MG_s_z_NW_76	6
MG_s_z_NW_77	20
MG_s_z_NW_78	0,00007

Die Flächen, die kleiner als 3 km² sind, liegen an der Landesgrenze von Nordrhein-Westfalen und gehen evtl. ins Nachbarland weiter. Deswegen wurden diese hier nicht aus-sortiert.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 44 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 44: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11883267	8849	Landesmodell_NRW		3D-Landesmodell von NRW
11883267_02	8852	Bohrung_NRW	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgelistet	Bohrdatenbank, Schichtenverzeichnisse
11883267_02	8860	Schichtenverzeichnisse	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgelistet	Schichtenverzeichnisse
11844870_01	6817	Zechstein_salinar	Verbreitungsgrenze	Die Verbreitungsgrenze des Zechstein-Salinars wurde als Bewertungsgrundlage herangezogen

1.2.6 Zechstein – Sachsen-Anhalt

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderung nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Zechstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Sachsen-Anhalt. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Zechstein die Salzformationen der Staßfurt- und Leine-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Zechstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Sachsen-Anhalt, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Perm, Zechstein, *Staßfurt-Formation*, *Leine-Formation*

Der Zechstein (Oberperm) kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Formationen untergliedert werden: Werra-, Staßfurt-, Leine, Aller-, Ohre-, Friesland und Fulda-Formation (z. B. Richter-Bernburg 1955). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Sachsen-Anhalt die Staßfurt- und Leine-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Zechstein und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Sachsen-Anhalt (siehe Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen des Zechstein sind im Untergrund von Sachsen-Anhalt weit verbreitet. Sie kommen im Norden Sachsen-Anhalts auf der Calvörde-Scholle, nördlich des Harzes in der Subherzyn-Mulde, im Südöstlichen Harzvorland und im Osten Sachsen-Anhalts vor.

Geologische Beschreibung

Der Zechstein (Oberperm) ist eine lithostratigraphische Einheit, die durch vollmarine Verhältnisse und die Bildung von mächtigen Steinsalzablagerungen geprägt ist (Meschede 2018). Infolge der Zechstein-Transgressionen erfolgte die Füllung des Zentraleuropäischen Beckens. Das Ablagerungsgebiet umfasst in Deutschland das Norddeutsche Becken und zieht sich bis hinein ins Thüringer Becken, das Werra- und Fulda-Gebiet sowie bis nach Nordrhein-Westfalen (Niederrhein). Die Transgressionen fanden in bis zu sieben Zyklen statt (Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland-, Fulda-Formation), die zur Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Gips / Anhydrit und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005b). Dabei sind die Zyklen in den verschiedenen Ablagerungsgebieten durchaus unterschiedlich ausgeprägt.

Der Norden Sachsen-Anhalts kann dem beckenzentralen Teil des Permbeckens zugeordnet werden, während der Süden und Osten Sachsen-Anhalts den Randbereichen des Beckens angehört und sich durch geringmächtigere Zechsteinvorkommen auszeichnet (Radzinski 2008a).

Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) ist im Norden Sachsen-Anhalts durch starke Mächtigkeitsunterschiede aufgrund lokaler Bereiche von Halokinese und Auslaugungen gekennzeichnet. In beckenzentralen Bereichen ist es mächtiger als in Randbereichen des Permbeckens (Radzinski 2008a). In der Subherzyn-Mulde besteht es aus bis zu 500 m mächtigem Steinsalz, das in Bereichen, in denen es halokinetisch bewegt wurde, auch Mächtigkeiten bis zu 900 m erreichen kann. Im randnahen Bereich ist das Steinsalz geringmächtiger. Es wird überlagert von bis zu 70 m mächtigen Kalisalzlagern (z2KST), die im Becken eine carnallitische Ausbildung und im Randbereich Hartsalze aufweisen.

Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) besteht auf der Calvörde-Scholle aus 150 m bis 300 m mächtigem Steinsalz, das bei halokinetischen Vorgängen Mächtigkeiten zwischen 20 m und 900 m erreicht. Das Steinsalz wird überlagert von 1 m bis 15 m (bei halokinetischen Vorgängen auch bis zu 70 m) mächtigen Kalisalzlagern (z2KST) aus kieseritischem Trümmercarnallit (Stottmeister et al. 2008). Darüber befindet sich eine 1 m bis 3 m mächtige Salzschiefer (z2NAd).

Das Staßfurt-Steinsalz sowohl in der Subherzyn-Mulde als auch auf der Calvörde-Scholle zeigt im tieferen Abschnitt eine Anhydritregion mit einer einförmigen Ausbildung, es ist von glasklarer, grauer oder weißgrauer Farbe mit Einlagerungen anhydritischer Lagen, fein verteiltem Ton und Anhydrit. Über der Anhydritregion befindet sich die Polyhalitregion mit feinkristallinen, polyhalitischen Lagen. Darüber ist die Kieseritregion vorhanden, die geprägt ist durch Steinsalz mit dünnen Kieseritlagen (Radzinski 2008a).

Das Leine-Steinsalz (z3NA) ist in der Subherzyn-Mulde nicht als z3NA vorhanden, sondern setzt sich aus verschiedenen lithostratigraphischen Einheiten zusammen. Insgesamt handelt es sich um eine etwa 150 m mächtige Salzschiefer, die sich kumulativ aus bis zu 9 m mächtigem Basissalz (z3LS1, Steinsalz mit Anhydritschnüren), bis zu 40 m mächtigem weißen Liniensalz (z3LS2, Salz mit hoher Reinheit, anhydritisch-polyhalitisch-tonigen Schnüren), bis zu 16 m mächtigem Kristallsalz (z3KS, rein und grobspätig),

zwischen 4 m und 11 m mächtigen Übergangsschicht (z3ÜS), bis zu 10 m mächtigem Bändersalz (z3BD, Steinsalz mit sich häufenden tonig-anhydritischen Lagen), bis zu 30 m mächtigem Anhydritmittelsalz (z3AS, Steinsalz mit Einschaltungen von Anhydrit) und zwischen 10 m bis 50 m mächtigem Tonflockensalz (z3TS, Steinsalz, abschnittsweise durch Tonflocken verunreinigt) zusammensetzt (Radzinski 2008a).

Das Leine-Steinsalz (z3NA) ist auf der Calvörde-Scholle ein 145 m mächtiges Steinsalz, welches aus 5 m mächtigem Basissalz (Steinsalz mit Anhydritschnüren), einem 25 m mächtigen Liniensalz (weißes Liniensalz mit hoher Reinheit und anhydritisch-polyhalitisch-tonigen Schnüren), 15 m mächtigem Kalisalzager Ronnenberg (z.T. sylvinitisch, carnallitisch) (Stottmeister et al. 2008), 10 m mächtigem Begleitsalz, etwa 75 m mächtigem Anhydritmittelsalz sowie 15 m mächtigem Tonmittelsalz und Schwadensalz besteht.

Das Werra-Steinsalz (z1NA) weist in der Subherzyn-Mulde bis zu 12 m mächtiges farbloses bis graues Steinsalz, das durch anhydritische Lagen unterteilt ist (Radzinski 2008a), und auf der Calvörde-Scholle weniger als 1 m mächtiges Steinsalz auf. Das Aller-Steinsalz (z4NA) kommt in der Subherzyn-Mulde mit zwischen 10 m und 50 m mächtigem Steinsalz, das aus Basis-, Schnee-, Schwaden- und Tonflockensalz besteht (Radzinski 2008a), und auf der Calvörde-Scholle mit 50 m mächtigem Steinsalz, das ebenfalls aus Basis-, Schnee-, Schwaden- und Tonflockensalz besteht, vor (Stottmeister et al. 2008). In der Ohre-Formation (z5) befindet sich eine dünne Lage mit zwischen 1 m und 4 m mächtigem Steinsalz auf der Calvörde-Scholle (Stottmeister et al. 2008). Diese drei Formationen des Zechsteinsalzes sind in Sachsen-Anhalt als potentielles Wirtsgestein zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle nicht mächtig genug.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 45). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 45: *Auflistung aller verwendeten Daten*

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BGE	11902999/ 9870	ts/pl	ST_SKUA_Export	SPBA-3D für Sachsen-Anhalt (Doornenbal & Stevenson 2010)
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
3	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Bundesländergrenzen inkl. 12-Seemeilen-Zone
4	DE	BGR		pdf	InSpEE-Bericht	PDF-Bericht zum InSpEE-Projekt (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
5	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturumrisse_500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesen- berg 2016; Pollok et al. 2016)
6	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturumrisse_1000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesen- berg 2016; Pollok et al. 2016)
7	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturumrisse_1500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesen- berg 2016; Pollok et al. 2016)
8	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturumrisse_2000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesen- berg 2016; Pollok et al. 2016)
9	DE	BGR	11844870_ 01/ 6821	pdf	BGR_Salzkarte_Be- gleitinformationen.pdf & BGR_Salz- karte_BlattA_150dpi.pdf	Übersichtskarte zur Salzverbreitung mit In- formationen
10	ST	LAGB	11884687/ 8927	txt		Bohrungsdaten

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 45 genannten Eingangsdaten wurden folgende drei thematische Karten verwendet:

Radzinski (2008): *Zechstein*. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): *Geologie von Sachsen-Anhalt*. S. 160-178, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2

1. Abb. 4.8.3-4: Fazies der Staßfurt- und Leine-Formation (z2, z3)

Franke (2020): *Geologie von Ostdeutschland (Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern) - Ein Kompendium*. Glienicke/Nordbahn: Dietrich Franke. Letzte Aktualisierung am: Last updated 12.02.2020. Zugriff am: 01.03.2020. <http://www.regionalgeologie-ost.de/>

2. Abb. 12: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Staßfurt-Formation (Zechstein 2) in Ostdeutschland
3. Abb. 13: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Leine-Formation (Zechstein 3) in Ostdeutschland

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Zechstein in Sachsen-Anhalt geprüft wurde, ist in Tabelle 46 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 46: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Zechstein aus der Basisfläche Zechstein ST_220_z_iso_rev01 (aus allen Kacheln)	b_Zechstein_ST.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Zechstein_ST_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Zechstein_ST_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_z_ST.dxf MG_s_z_ST.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Polygon-Featureclass der DXF-Fläche in 2D-Polygon umwandeln	ST_Zechstein_Polygon
b) Dissolve des 2D-Polygons	ST_Zechstein_Polygon_Diss
c) Einladen und dissolven der Salzstrukturen im Norddeutschen Becken	Salzdiapire_NDB_Polygon_Diss
d) Einladen der IG Salz steil	IG_d_DE
e) Entfernen („radieren“) der Salzstrukturen aus Salz flach	ST_Zechstein_Polygon_Diss_flach
f) Entfernen („radieren“) der IG Salz steil aus Salz flach	ST_Zechstein_Polygon_Diss_flach2
g) Importieren, Georeferenzieren und Vektorsieren der Salzvorkommen aus den Paläogeographischen Karten und auf Sachsen-Anhalt zuschneiden	Verbreitung_Staßfurt_Leine, Verbreitung_Staßfurt, Verbreitung_Leine
h) Salzvorkommen Zechstein mit Modellfläche verschneiden („Überschneiden“)	ST_Zechstein_Polygon_Diss_flach2_Verbreitung_Staßfurt_Leine, ST_Zechstein_Polygon_Diss_flach2_Verbreitung_Staßfurt, ST_Zechstein_Polygon_Diss_flach2_Verbreitung_Leine
i) Zusammenführen („Merge“) der drei Features	ST_Zechstein_Polygon_Diss_flach2_Karten
j) Erweiterung der Modellfläche in dem Bereich, in dem kein Modell vorlag	ST_Zechstein_Polygon_Diss_flach2_Karten_ges
k) Einladen der vorgefilterten Bohrungen („XY-Tabelle in Punkt“)	ST_Auswahl_Bohrungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
l) Eliminieren („Punkt radieren“) der Bohrungen, die in Salzstrukturen liegen und Sortieren der Bohrungen nach Mächtigkeit Salz unter Entfernung der Bohrungen mit Salz in kleiner als 300 m und größer als 1500 m Tiefe	ST_Bohrungen_Zechstein_Salz_ausserhalb-Salzstock_groesser100m
m) Vergrößern der Fläche nach Informationen aus Bohrungen, alle Gebiete zu einem zusammenfügen („merge“ und „dissolve“) und in einzelne Features zerschneiden („Trennen“)	ST_Zechstein_Polygon_Diss_flach2_Karten_ges_Bohrungen
n) Löschen von zu kleinen Gebieten	
o) Export einer Shape-Datei	ST_Zechstein_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 46 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete 3D-Modell für Sachsen-Anhalt wurde im Rahmen der Standortauswahl durch externe Dienstleister auf Basis des 2D-Kartenwerkes des SPBA erstellt (Doornenbal & Stevenson 2010). Auf Basis von Isolinien wurden Hilfsflächen modelliert, deren Verschneidungen und Durchdringungen entfernt wurden. Aus diesen Hilfsflächen wurden elf Basisflächen modelliert.

- Tertiär (ST_131_t_iso_rev01)
- Oberkreide (ST_140_kro_iso_rev01)
- Unterkreide (ST_150_kru_iso_rev01)
- Oberjura (ST_160_jo_iso_rev01)
- Mitteljura (ST_170_jm_iso_rev01)
- Unterjura (ST_180_ju_iso_rev01)
- Keuper (ST_190_k_iso_rev01)
- Oberer Buntsandstein (ST_201_so_iso_rev01)
- Unterer Buntsandstein (ST_210_su_iso_rev01)
- Zechstein (ST_220_z_iso_rev01)
- Rotliegendesedimente (ST_240_ro_iso_rev01)

Störungen sind im Datensatz des SPBA als Linien ohne Teufenangaben ausgewiesen. Im SPBA-3D wurden diese Störungslinien auf die modellierten Flächen projiziert, ohne die Basisflächen zu versetzen.

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 46 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Zechstein wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche Zechstein ST_220_z_iso_rev01 verwendet (Tabelle 46, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Sachsen-Anhalt wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 46, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 46, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 46, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Zechstein und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Unteren und Oberen Buntsandstein, Keuper, Unterjura, Mitteljura, Oberjura, der Unter- sowie Oberkreide, des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 46, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 46, Nr. 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300-1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 46, Nr. 2h). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Zechstein in flacher Lagerung wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 46, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Das Wirtsgestein Steinsalz umfasst nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im SPBA-3D für Sachsen-Anhalt. Durch die Verwendung von thematischen Karten und Bohrungsdaten wurden Gebiete spezifischer ausgewiesen, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Alle verwendeten Informationen (vgl. Tabelle 45) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt (Tabelle 46, Nr. 3). Die aus dem Geomodell extrahierten Flächen, die eine Mindestmächtigkeit des Zechsteins von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m und 1500 m vorkommen, wurden zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wird (Tabelle 46, Nr. 3a und 3b). Zusätzlich wurden die aus den Modellen bekannten Salzstrukturen in das Projekt eingeladen und so weit aufbereitet (Tabelle 46, Nr. 3c), dass diese aus den Flächen mit dem flach gelagerten Zechstein herausgeschnitten werden können, da es dort zum Teil Überschneidungen gab (Tabelle 46, Nr. 3e). Weiterhin wurden die identifizierten Gebiete von Salz in steiler Lagerung importiert (Tabelle 46, Nr. 3d). Auch diese wurden aus den Modellflächen ausgeschnitten (Tabelle 46, Nr. 3f).

Zusätzlich wurden die Verbreitungskarten des Salzes im Zechstein aus Radzinski (2008a) sowie aus Franke (2020) importiert, georeferenziert und vektorisiert (Tabelle 46, Nr. 3g). Beim Vergleich der paläogeographischen Karten mit den Modellflächen gab es größere Unterschiede. Die Modellflächen wiesen eine größere Ausbreitung auf, da die Modellflächen die gesamte Zechsteinverbreitung zeigen, die paläogeographischen Karten beschränken sich dagegen auf die Steinsalzverbreitung. Deswegen wurden die Modellflächen mit der Steinsalzverbreitung aus den paläogeographischen Karten verschnitten (Tabelle 46, Nr. 3h). Es entstanden Flächen, die Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und in einer Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m aufweisen und die gemäß der Verbreitungskarten Steinsalz zeigen (Tabelle 46, Nr. 3i).

Im Süden Sachsen-Anhalts liegen keine Modelldaten vor. In diesem Bereich wurde die gelieferte Modellfläche mit den paläogeographischen Karten erweitert (Tabelle 46, Nr. 3j). Dafür wurde die paläogeographische Karte, die die Verbreitung des Leine-Steinsalzes zeigt, von Franke (2020) verwendet, da diese die größte Ausdehnung aufweist und zu den Gebieten, die die Mindestanforderungen für stratiformes Steinsalz in Thüringen erfüllen, eine gute Erweiterung darstellt.

Um einen Positivbeweis der Flächen durchführen zu können, wurden Bohrungen so weit gefiltert, dass diese Bohrungen Steinsalz im Zechstein in der richtigen Tiefenlage zeigen. Dann wurden die Bohrungen in das GIS-Projekt importiert (Tabelle 46, Nr. 3k). Die Bohrungen, die innerhalb der Salzstrukturen lagen, wurden entfernt und nicht weiter betrachtet. Anschließend wurden die Bohrungen nach Mächtigkeiten von Salz sortiert. So entstand eine Shape-Datei, die die Bohrungen mit Salzmächtigkeiten von mehr als 100 m enthält (Tabelle 46, Nr. 3l).

Die aus der Verschneidung der paläogeographischen Karten mit den Modellflächen entstandenen Flächen wurden anhand der Bohrungen überprüft. Einige Bohrungen mit ausreichender Salzmächtigkeit lagen außerhalb der Modellflächen, jedoch immer in nächster Nähe zu einer Fläche. Außerdem weisen die paläogeographischen Karten in diesen Bereichen ein Vorkommen von Steinsalz auf und es liegen keine Salzstrukturen oder identifizierte Gebiet von Salz in steiler Lagerung in der Nähe. Somit konnten diese Bohrungen Steinsalz in flacher Lagerung zugeordnet werden. Die Modellflächen wurden um die Bohrungen vergrößert. Dafür wurden die Bohrungen mit Puffern umgeben, die dem Abstand bis zur nächsten Fläche entsprechen. Diese Puffergebiete wurden der Fläche hinzugefügt. Außerdem wurde ein Abgleich durchgeführt zwischen Flächen, die durch die Verschneidung mit den paläogeographischen Karten weggefallen sind, und der Lage der Bohrungen. Lagen Bohrungen in Gebieten, die durch die Verschneidung eliminiert wurden, sind diese Flächen dennoch wieder in das weitere Verfahren aufgenommen worden, da die Bohrungen eine Salzmächtigkeit von mehr als 100 m anzeigen und die Modellflächen dort Zechstein in ausreichender Mächtigkeit und richtiger Tiefenlage aufweisen. Dies war bei keiner Bohrung der Fall. Die anderen relevanten Bohrungen lagen alle innerhalb der aus dem Modell extrahierten Flächen und den Verbreitungskarten, sodass hier keine Erweiterung erfolgen musste (Tabelle 46, Nr. 3m).

Anschließend wurden die neu entstandenen Gebiete hinsichtlich ihrer Fläche überprüft und Gebiete mit einer Fläche von weniger als 3 km² aufgrund der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ gelöscht (Tabelle 46, Nr. 3n). Die verbleibenden Gebiete wurden benannt und anschließend als Shape-Datei exportiert (Tabelle 46, Nr. 3o).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10⁻²¹ m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10⁻¹² m/s und weniger.

Die lithostratigraphischen Einheiten z2NA (Staßfurt-Steinsalz) und z3NA (Leine-Steinsalz) haben gemäß der Inventarisierungstabelle für Sachsen-Anhalt (siehe Kapitel 5) als Hauptkomponente Steinsalz. Diese Einheiten sind in allen ausgewiesenen Gebieten verbreitet. Nach AkEnd (2002) wurde im Steinsalz anhand von 75 Messwerten in einer mittleren Teufe von 300 m bis 841 m eine mittlere Gebirgsdurchlässigkeit von etwa 10⁻¹⁴ m/s berechnet.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für das Wirtsgestein Steinsalz im Zechstein in den verbleibenden Gebieten in Sachsen-Anhalt **erfüllt** ist.

*Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG*

Die Mächtigkeit des Zechstein wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Zechstein zusammen.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass die Salzformationen des Zechstein in erforderlicher Mächtigkeit vorliegen.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

*Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG*

Die Tiefenlage des Zechstein wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass die Salzformationen des Zechstein in erforderlicher Tiefe vorliegen.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 27 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Zechstein in Sachsen-Anhalt dargestellt.

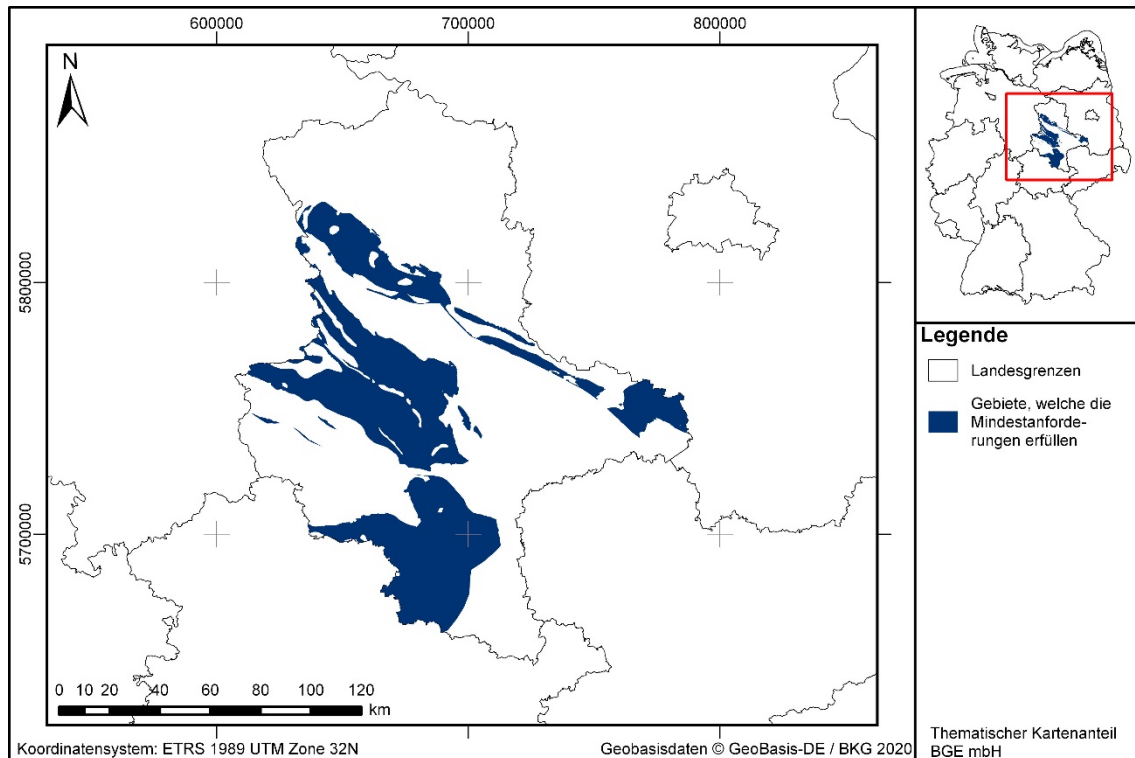


Abbildung 27: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Sachsen-Anhalt

Eine Auflistung der Gebiete in Sachsen-Anhalt, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 47 zu finden.

Tabelle 47: Auflistung aller Gebiete in Sachsen-Anhalt, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_ST_1	0,17
MG_s_z_ST_2	2009
MG_s_z_ST_3	6
MG_s_z_ST_4	8
MG_s_z_ST_5	7
MG_s_z_ST_6	12
MG_s_z_ST_7	22
MG_s_z_ST_8	392

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_ST_9	66
MG_s_z_ST_10	2424
MG_s_z_ST_11	23
MG_s_z_ST_12	1043

Die Fläche, die kleiner als 3 km² ist, liegt an der Landesgrenze von Sachsen-Anhalt und geht evtl. ins Nachbarland weiter. Deswegen wurde diese hier nicht aussortiert.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 48 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 48: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11902999	9870	MV_SKUA_Export		SPBA-3D für Sachsen-Anhalt
11884687	8927		Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgelistet	Bohrdatenbank

Darüber hinaus werden die Verbreitungsgrenzen des Staßfurt Steinsalzes folgender thematischer Karte als entscheidungserheblich angesehen:

Radzinski (2008): *Zechstein*. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 160-178, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2

1. Abb. 4.8.3-4: Fazies der Staßfurt- und Leine-Formation (z2, z3)

Weiterhin werden die Verbreitungsgrenzen des Staßfurt-Steinsalzes und des Leine-Steinsalzes folgender thematischer Karten als entscheidungserheblich eingestuft. Die Verbreitungsgrenze des Leine-Steinsalzes wurde ebenfalls zur Erweiterung der Fläche in dem Bereich, in dem kein 3D-Modell vorlag, angewendet:

Franke (2020): *Geologie von Ostdeutschland (Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern) - Ein Kompendium*. Glienicke/Nordbahn: Dietrich Franke. Letzte Aktualisierung am: Last updated 12.02.2020. Zugriff am: 01.03.2020. <http://www.regionalgeologie-ost.de/>

2. Abb. 12: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Staßfurt-Formation (Zechstein 2) in Ostdeutschland
3. Abb. 13: Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Leine-Formation (Zechstein 3) in Ostdeutschland

1.2.7 Zechstein – Schleswig-Holstein

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Zechstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Schleswig-Holstein. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Zechstein die Salzformationen der Staßfurt-, Leine-, Aller- und Ohre-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Zechstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Schleswig-Holstein, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Perm, Zechstein, *Staßfurt-Formation*, *Leine-Formation*, *Aller-Formation*, *Ohre-Formation*

Der Zechstein (Oberperm) kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Formationen untergliedert werden: Werra-, Staßfurt-, Leine, Aller-, Ohre-, Friesland und Fulda-Formation (z. B. Richter-Bernburg 1955). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Schleswig-Holstein die Staßfurt-, Leine-, Aller- und Ohre-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Zechstein und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Schleswig-Holstein (siehe Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Der Zechstein ist flächendeckend in Schleswig-Holstein vorhanden. Generell liegt mehr als 100 m mächtiges Steinsalz vor, welches jedoch in großen Teilen von Schleswig-Holstein in Tiefen größer 1500 m vorkommt. Im relevanten Teufenbereich zwischen 300 m und 1500 m u. GOK befindet sich der Zechstein nur unter Helgoland.

Geologische Beschreibung

Der Zechstein (Oberperm) ist eine lithostratigraphische Einheit, die durch vollmarine Verhältnisse und die Bildung von mächtigen Steinsalzablagerungen geprägt ist (Meschede 2018). Infolge der Zechstein-Transgressionen erfolgte die Füllung des Zentraleuropäischen Beckens. Das Ablagerungsgebiet umfasst in Deutschland das Norddeutsche Becken und zieht sich bis hinein ins Thüringer Becken, das Werra- und Fulda-Gebiet sowie bis nach Nordrhein-Westfalen (Niederrhein). Die Transgressionen fanden in bis zu sieben Zyklen statt (Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland-, Fulda-Formation), die zur Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Gips / Anhydrit und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005b). Dabei sind die Zyklen in den verschiedenen Ablagerungsgebieten durchaus unterschiedlich ausgeprägt.

Aufgrund der Entwicklungsgeschichte ist Schleswig-Holstein in drei tektonische Strukturbereiche unterteilt: Glückstadt-Graben, Westschleswig-Block, Ostholstein-Westmecklenburg-Block (Thomsen & Liebsch-Dörschner 2014), wobei Helgoland zum Westschleswig-Block gezählt wird.

Die Gesamtmächtigkeit des Zechstein-Schichtpakets liegt in Schleswig-Holstein bei etwa 1500 m (Thomsen & Liebsch-Dörschner 2014), eine detaillierte Auflistung der Mächtigkeiten der verschiedenen Formationen und der darin enthaltenen Steinsalze ist nicht zu finden.

Die Staßfurt-Formation besteht aus Karbonat und Anhydrit an der Basis, darüber folgen das Staßfurt-Steinsalz, Kalisalz und Decksteinsalz, gefolgt von Deckanhydrit. Die Steinsalz-Mächtigkeiten können größer als 100 m sein.

Die Leine-Formation setzt sich zusammen aus dem Grauen Salzton, Plattendolomit, Hauptanhydrit und dem Leine-Steinsalz. Dieses weist in der Bohrung LOCID422 (vgl. Anhang) eine Mächtigkeit von mehr als 100 m auf.

Die Aller-Formation besteht aus dem Roten Salzton an der Basis, darüber Pegmatitanhydrit und dem Aller-Steinsalz, die Ohre-Formation aus Salzbrockenton, Lagenanhydrit, Ohre-Steinsalz und Grenzanhydrit. Die Steinsalz-Mächtigkeiten können jeweils mehr als 100 m betragen.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 49). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N /

ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 49: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales Gelände- Modell
3	SH	LLUR	11839735/ 6220	pl/ts	3D_Basismodell_SH	3D-Modell (Hese et al. 2012)
4	DE	BGR	11844870_01/ 6821	pdf	BGR_Salzkarte_Be- gleitinformationen.pdf & BGR_Salzkarte_BlattA_150dpi. pdf	Übersichtskarte zur Salzverbreitung mit Informationen
5	DE	BGR	11844870_01/ 6817	mpk	Zechstein_salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
6	SH	LLUR	11873390/ 7714	mdb	Archiv_LLURgr300	Bohrdatenbank
7	SH	LLUR	11873390/ 7713	mdb	KW_Daten	Bohrdatenbank

Eigenrecherche

Für die Anwendung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung im Zechstein in Schleswig-Holstein waren keine weiteren Daten oder Karten erforderlich.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Zechstein in Schleswig-Holstein geprüft wurde, ist in Tabelle 50 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 50: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Zechstein aus der Basisfläche	b_Zechstein_SH.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Zechstein_SH_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Zechstein_SH_MACRORESULT_qs.ts
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_z_ST.dxf MG_s_z_ST.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Polygon-Featureclass der DXF-Fläche in 2D-Polygon umwandeln	SH_Zechstein_Polygon
b) Dissolve des 2D-Polygons	SH_Zechstein_Polygon_Diss
c) Einladen der Paläogeographischen Karte (BASAL)	BASAL_Zechstein
d) Einladen der Salzstrukturen im Norddeutschen Becken	Salzdiapire_NDB

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
e) Einladen der vorgefilterten Bohrungen („XY-Tabelle in Punkt“)	SH_Auswahl_Bohrungen
f) Eliminieren („Punkt radieren“) der Bohrungen, die in Salzstrukturen liegen	SH_Bohrungen_Zechstein_ausserhalbSalzstock
g) Sortieren der Bohrungen nach Mächtigkeit Salz unter Entfernung der Bohrungen mit Salz in kleiner als 300 m und größer als 1500 m Tiefe	SH_Bohrungen_Zechstein_ausserhalbSalzstock_groesser100m
h) Export einer Shape-Datei	SH_Zechstein_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 50 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Zur Modellierung der Steinsalzschichten wurde das geologische 3D-Basismodell SH verwendet. Auf die Verwendung des StörTief-Modells wurde verzichtet, da das dortige Modelliergebiet kleiner ist (es fehlen relevante Bereiche der Nordsee). Die relevanten stratigraphischen Horizonte sind in beiden Modellen ähnlich modelliert worden.

Das Basismodell SH ist ein erstes geologisches 3D-Modell des Geologischen Dienstes Schleswig-Holstein (des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume LLUR) aus dem Jahr 2012 (Hese et al. 2012). Zur Bearbeitung des Modells wurden Daten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland (Baldschuhn 2001) verwendet. Störungsflächen wurden nicht als durchgehende Flächen ausgehalten, sondern lediglich als vertikale Versätze dargestellt. Das modellierte Gebiet umfasst das komplette Bundesland Schleswig-Holstein inklusive der 12 Seemeilenzone. Folgende Flächen wurden hauptsächlich als Basisflächen modelliert:

- GTA3D_00_Topographie: Geländeoberfläche
- GTA3D_01_Basis_TmiR: Mittleres Miozän
- GTA3D_02_Basis_TmiU: Miozän
- GTA3D_03_Basis_ToIM: Mittleres Oligozän
- GTA3D_04_Basis_TeoM: Mittleres Eozän
- GTA3D_05_Basis_TpaO: Oberes Paläozän
- GTA3D_06_Basis_KrO: Obere Kreide
- GTA3D_07_Basis_KrU: Untere Kreide
- GTA3D_08_Basis_JO: Oberer Jura

- GTA3D_09_Basis_JM: Mittlerer Jura
- GTA3D_10_Basis_JU: Unterer Jura
- GTA3D_11_Basis_K: Keuper
- GTA3D_12_Basis_SO: Oberer Buntsandstein
- GTA3D_13_Basis_SU: Unterer Buntsandstein
- GTA3D_14_Basis_Z: Zechstein
- GTA3D_Salzdiapire: Hüllflächen der Salzstrukturen

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 50 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen wurde als Bearbeitungsfläche des Zechstein die Basisfläche „GTA3D_14_Basis_Z“ verwendet (Tabelle 50, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Schleswig-Holstein wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 50, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 50, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 50, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Zechstein und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus der Basisfläche des Unteren Buntsandstein sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 50, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 50, Nr. 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300-1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 50 Nr. 2g). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Zechstein wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 50, Nr. 2h).

2D-Bearbeitung

Das Wirtsgestein Steinsalz umfasst nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell Schleswig-Holsteins. Durch die Verwendung von thematischen Karten und Bohrungsdaten wurden Gebiete spezifischer ausgewiesen, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Alle verwendeten Informationen (vgl. Tabelle 49) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt (Tabelle 50, Nr. 3). Die aus dem Geomodell extrahierte Fläche für Schleswig-Holstein, die eine Mindestmächtigkeit des Zechstein von 100 m aufweist und in einer Tiefe zwischen 300 m und 1500 m vorkommt, befindet sich lediglich im Westschleswig-Block (Thomsen & Liebsch-Dörschner 2014) im Bereich von Helgoland. Die Fläche wurde zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurde sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wird (Tabelle 50, Nr. 3a und 3b). Zusätzlich wurden die aus den Modellen bekannten Salzstrukturen in das Projekt eingeladen (Tabelle 50, Nr. 3d).

Anschließend wurde die Verbreitungskarte des Salzes im Zechstein aus dem BASAL-Bericht, die die Verbreitung des Zechsteinsalzes und nicht der einzelnen Zyklen enthält, importiert (Tabelle 50, Nr. 3c). Beim Vergleich beider Flächen fiel auf, dass die importierte Modellfläche innerhalb der Fläche, die Steinsalzvorkommen zeigt, der BASAL-Karte liegt (Reinhold et al. 2014). Somit musste keine Verschneidung beider Flächen durchgeführt werden.

Außerdem wurde ein Vergleich der Modellfläche mit den Salzstrukturen im Norddeutschen Becken durchgeführt. Die Salzstrukturen lagen alle außerhalb der ausgewiesenen Modellfläche, sodass auch hier keine Verschneidung stattfand.

Um einen Positivbeweis der Flächen durchführen zu können, wurden die Bohrungen so weit gefiltert, dass diese Bohrungen Steinsalz im Zechstein in der richtigen Tiefenlage zeigen. Dann wurden die Bohrungen in das ArcGIS Pro-Projekt importiert (Tabelle 50, Nr. 3e). Die Bohrungen, die innerhalb der Salzstrukturen lagen, wurden entfernt und nicht weiter betrachtet (Tabelle 50, Nr. 3f). Anschließend wurden die Bohrungen nach Mächtigkeiten von Salz sortiert. So entstand eine Shape-Datei, die die Bohrungen mit Salzmächtigkeiten von mehr als 100 m enthält (Tabelle 50, Nr. 3g).

Es gibt eine Bohrung (LOCID 422, vgl. Anhang), die Steinsalz des Zechstein in ausreichender Mächtigkeit in der richtigen Tiefenlage aufweist. Da diese Bohrung innerhalb der Modellfläche liegt, musste hier keine weitere Bearbeitung stattfinden.

Anschließend wurde das Gebiet hinsichtlich der Fläche aufgrund der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ überprüft. Es gab keine Fläche, die unter 3 km² groß war. Das verbleibende Gebiet wurde benannt und anschließend als Shape-Datei exportiert (Tabelle 50, Nr. 3h).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die lithostratigraphischen Einheiten z3NA (Leine-Steinsalz) und z4NA (Aller-Steinsalz), welche im ausgewiesenen Gebiet bei Helgoland die relevanten Steinsalzhorizonte aufweisen, haben gemäß der Inventarisierungstabelle für Schleswig-Holstein (siehe Kapitel 5) als Hauptkomponente Steinsalz. Daher wird in dem verbleibenden Gebiet die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **erfüllt** eingeschätzt.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Die Mächtigkeit des Zechstein wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht. Einzig im Bereich um Helgoland wurden Mächtigkeiten über 100 m in geeigneter Tiefenlage ermittelt.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigt die bereits zur Flächenbearbeitung benutzte Bohrung (vgl. Anhang), dass die Salzformationen des Zechstein in erforderlicher Mächtigkeit vorliegen.

Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Die Tiefenlage des Zechstein wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigt die bereits zur Flächenbearbeitung benutzte Bohrung (vgl. Anhang), dass die Salzformationen des Zechstein in erforderlicher Mächtigkeit vorliegen.

Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 28 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Zechstein in Schleswig-Holstein dargestellt.

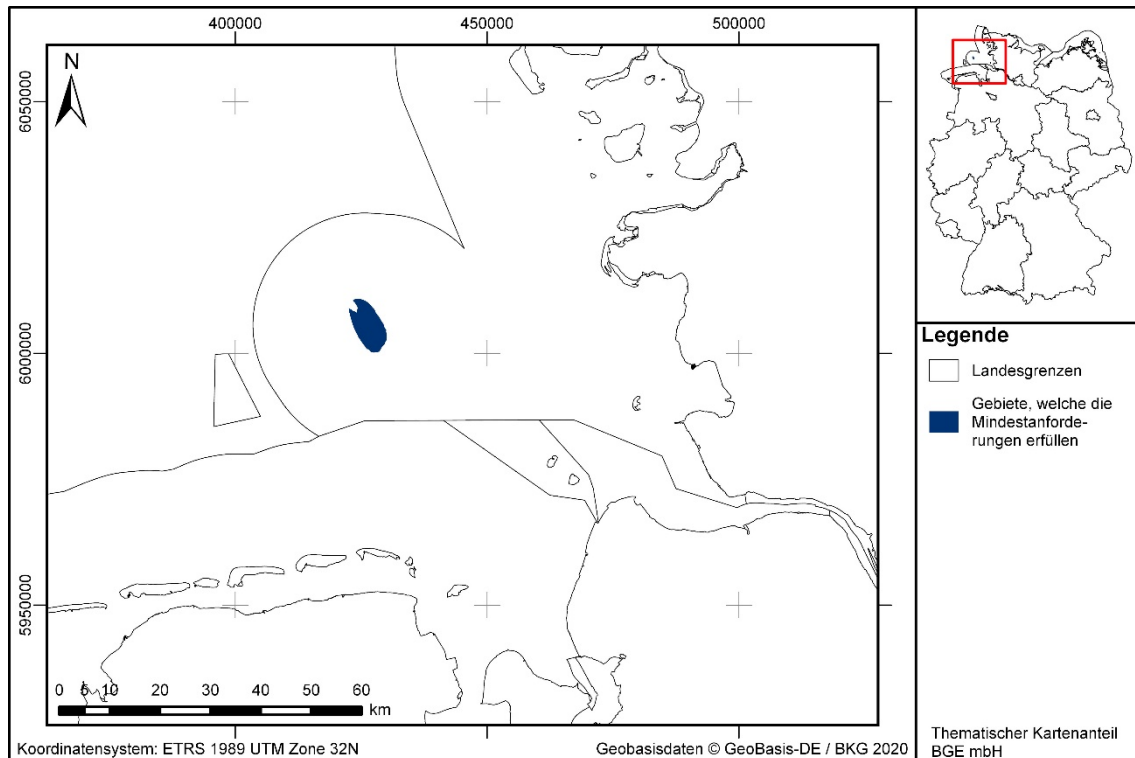


Abbildung 28: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Zechstein in Schleswig-Holstein

Eine Auflistung der Gebiete in Schleswig-Holstein, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 51 zu finden.

Tabelle 51: Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_z_SH_1	49

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 52 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 52: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11839735	6220	3D_Basismodell_SH		Die unmittelbare Grenzziehung stammt aus der Auswertung des 3D-Modells
11873390	7713	KW_Daten	Schichtenverzeichnis der entscheidungserheblichen Bohrung LOCID 422 ist in Anhang 1 aufgelistet	Bohrdatenbank

1.2.8 Zechstein – Thüringen, Bayern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Zechstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Thüringen und Bayern. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Zechstein die Salzformationen der Werra-, Staßfurt-, Leine- und ggf. der Aller-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Zechstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung war die Ausweisung von Gebieten in Thüringen und Bayern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Perm, Zechstein, *Werra-Formation*, *Staßfurt-Formation*, *Leine-Formation*, (*Aller-Formation*)

Der Zechstein (Oberperm) kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Formationen untergliedert werden: Werra-, Staßfurt-, Leine, Aller-, Ohre-, Friesland und Fulda-Formation (z. B. Richter-Bernburg 1955). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Thüringen und Bayern die Werra-Formation, sowie in Thüringen zusätzlich die Staßfurt-, Leine- und – eingeschränkt – die Aller-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Zechstein und deren lithologische Ausprägung kann den Inventarisierungstabellen für Thüringen und Bayern entnommen werden (siehe Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen des Zechstein sind im Untergrund von Thüringen weit verbreitet. In Bayern kommen diese im Nordwesten im Fränkischen Becken an der Grenze zu Thüringen vor: Thüringer Becken, Werra-Becken, südlich des Thüringer Waldes bis nach Nordbayern und Nordhessen.

Geologische Beschreibung

Der Zechstein (Oberperm) ist eine lithostratigraphische Einheit, die durch vollmarine Verhältnisse und die Bildung von mächtigen Steinsalzablagerungen geprägt ist (Meschede 2018). Infolge der Zechstein-Transgressionen erfolgte die Füllung des Zentraleuropäischen Beckens. Das Ablagerungsgebiet umfasst in Deutschland das Norddeutsche Becken und zieht sich bis hinein ins Thüringer Becken, das Werra- und Fulda-Gebiet sowie bis nach Nordrhein-Westfalen (Niederrhein). Die Transgressionen fanden in bis zu sieben Zyklen statt (vom Liegenden zum Hangenden: Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland-, Fulda-Formation (Richter-Bernburg 1955), die zur Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Sulfaten und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005b). Dabei sind die Zyklen in den verschiedenen Ablagerungsgebieten durchaus unterschiedlich ausgeprägt.

Das Thüringer Becken sowie das Werra-Gebiet südlich des Thüringer Waldes verfügen über weit verbreitete Ablagerungen des Zechsteins im Untergrund. Im Thüringer Becken sind mächtige stratiforme Steinsalz-Ablagerungen aus Werra-, Staßfurt-, Leine und ggf. Aller-Formation bekannt. Im Werra-Gebiet, südlich des Thüringer Waldes, welches sich bis nach Nordhessen und Nordbayern erstreckt, gibt es mächtige Steinsalze aus der Werra-Formation. Das Werra-Steinsalz wird vorwiegend durch Auslaugung begrenzt (Seidel 2013).

Das Werra-Steinsalz (z1NA) ist ein weiß bis weißgrauer Halitit, z.T. tonig oder anhydritisch. Die durch Bohrungen nachgewiesenen Mächtigkeiten schwanken stark bis max. 375 m. Die größten Mächtigkeiten werden im Werra-Gebiet erreicht. Im Werra-Gebiet wird das Werra-Steinsalz von zwei Kaliflözen unterbrochen. Das untere Kaliflöz Thüringen erreicht 2 bis 4 m, das obere Kaliflöz Hessen 2 bis 3 m. Große Steinsalzmächtigkeiten von über 100 m sind bis nach Nordbayern durch Bohrungen nachgewiesen.

Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) wird als relativ reiner Halitit beschrieben und weist im Thüringer Becken in Bohrung nachgewiesenen Mächtigkeiten von bis zu 617 m auf, wobei es sich dabei ggf. aufgrund z. B. potenziell geneigter Bohrungen um scheinbare Mächtigkeiten handeln könnte. Seidel (2013) erwähnt Mächtigkeiten von über 300 m, die ihre Hauptverbreitung im nördlichen Thüringer Becken haben. Oberhalb des Steinsalzes folgt ein bis zu 23,5 m mächtiges Kalisalzflöz (z2Kst).

Das Steinsalz der Leine-Folge (z3NA) wird als Halitit beschrieben und weist nach Seidel (2013) Mächtigkeiten von bis zu 153 m auf; das Aller-Steinsalz (z4NA), ebenfalls als Halitit beschrieben, hat Mächtigkeiten von bis zu 45 m. Das Leine-Steinsalz ist im Nordwesten und Zentrum des Thüringer Beckens verbreitet.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 53). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 53: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	TH	TLUG	11840020/912	pl/ts	INFLUINS	3D-Modell Thüringer Becken (Thüringer Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz 2014)
2	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
3	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
4	TH	TLUG	11844858_01/935	mdb	BGE_Anfrage_Bohrungen	Bohrdatenbank
5	TH	TLUG	11844858_01/937-939	shp	II1-2027_1963_An18_z1NA_...	Mächtigkeitkarte
6	TH	TLUG	11844858_01/940-942	shp	II1-2027_1963_An122_z2NA_...	Mächtigkeitkarte
7	TH	TLUG	11844858_01/943-945	shp	II1-2027_1963_An126_z3NA_...	Mächtigkeitkarte
8	TH	TLUG	11844858_01/946-948	shp	II1-2027_1963_An128_z4NA_...	Mächtigkeitkarte
9	TH	TLUG	11844858_02/966-968	shp	II1-3535_1984_An104_z1NA_...	Mächtigkeitkarte
10	BY	LfU	11842369_04/4299	xlsx	Digitale_Schichtverzeichnisse	Bohrdatenbank
11	BY	LfU	11842369_04/4300	xlsx	Stammdaten	Bohrdatenbank

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
12	DE	BGR	11844870_01/ 6817	mpk	Zechstein_salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)

Mächtigkeitkarten

Von der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie wurden für das Werra-Steinsalz z1NA zwei detaillierte Mächtigkeitkarten im Maßstab 1:200.000 (1963 (DokID 11844858_01) und 1984 (DokID 11844858_02)) geliefert und jeweils eine Mächtigkeitkarte von 1963 im Maßstab 1:200.00 für die Steinsalze der Staßfurt- (z2NA), Leine- (z3NA) und Aller-Formation (z4NA). Diese liegen als Polylinien-Shapes inklusive der Auslaugungsgrenze vor. Die Karten von 1963 decken das gesamte Thüringer Becken ab inklusive der Abschnitte in Sachsen-Anhalt und Hessen sowie das Werra-Gebiet südlich des Thüringer Waldes. Die Karte von 1984 ist auf den westlichen Teil des Thüringer Beckens beschränkt.

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 53 genannten Eingangsdaten wurden folgende drei thematische Karten verwendet:

Seidel (2013): Stratigraphie, Fazies und geologische Stellung des Zechsteins und der Trias Thüringens. Beiträge zur Geologie von Thüringen. Neue Folge, Bd. 20, S. 21 – 78.

1. „Mächtigkeitkarte des Werrasteinsalzes“ Abbildung 4 auf S. 29
2. „Mächtigkeitkarte Staßfurtsalz“ Abbildung 9 auf S. 37

Die beiden Mächtigkeitkarten genannten Karten liegen für das gesamte Landesgebiet von Thüringen im Maßstab 1:500.000 vor. Die Auflösung der Isopachen ist gering im Vergleich zu den vom TLUG gelieferten Karten (vgl. Tabelle 53, Nr. 5 bis 9). Die Mächtigkeitinformationen wurden daher nur als Kontrolle herangezogen und dort, wo aus den anderen Karten keine Informationen vorliegen (südlich des Thüringer Waldes und Osten des Thüringer Beckens). Auslaugungslinien sind enthalten und wurden äquivalent verwendet. Relevante Bohrungen mit Mächtigkeitangaben sind für die angrenzenden Gebiete in Hessen, Bayern und Sachsen-Anhalt eingetragen und dienen als Orientierung für die dortige Bearbeitung.

Ziegler (1989): North German Zechstein facies patterns in relation to their substrate. Geologische Rundschau, 78, S. 105-127

3. „Werra Anhydrite isopach map including Werra Salt distribution“ Abbildung 3 auf S. 110

Diese paläogeographische Karte erstreckt sich über weite Teile von Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Hessen, Thüringen, Bayern und Sachsen-Anhalt und behandelt die Werra-Formation. Für das Werra-Steinsalz sind die Ablagerungsbereiche qualitativ, aber ohne Mächtigkeitsinformationen angegeben.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Zechstein in Thüringen geprüft wurde, ist in Tabelle 54 aufgelistet. Die Schrittfolge für Bayern ist in Tabelle 55 zu finden. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 54: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen in Thüringen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche / Daten
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	TH_DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; TH_DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Zechstein aus der Basisfläche z1CA_z1C	b_Zechstein_TH.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche / Daten
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Zechstein_TH_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Zechstein_TH_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_z_TH.dxf MG_s_z_TH.txt
3. Integration von 2D geologischen Informationen	
a) ArcGIS Projekt	TH_Salz_stratiform_Zechstein.aprx
b) DXF-Fläche einladen und Dreiecke auflösen	TH_Zechstein_300_1500_100m_dxf_dissolve.shp
c) Auswertung der Mächtigkeitskarten 1:200.000 (1963 und 1984); vgl. Schritte 1-6 in Abschnitt 2D-Bearbeitung	z1NA_Maechtigkeit, z2NA_Maechtigkeit, z3NA_Maechtigkeit, z4NA_Maechtigkeit
d) Addieren der Mächtigkeitskarten 1:200.000 (1963 und 1984); Schritte 7-9	z1_4_NA_Maechtigkeit_Union
e) Entfernen der Gebiete mit kumulierten Steinsalz-Mächtigkeiten kleiner als 100 m	z1_4_NA_Maechtigkeit_Union_Di
f) Für den durch das 3D-Modell abgedeckten Bereich verschneiden mit der DXF-Fläche; Schritte 12-14	z1_4_NA_Maechtigkeit_Union_DXF
g) Abgleich der Außengrenzen mit den Mächtigkeitsinformationen und Auslaugungslinien von (Seidel 2013); Werra+Stäufurt-Salz; Schritt 15	z1_4NA_dxf_Seidel

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche / Daten
h) Alle Bohrungen aus .mdb plotten, die Steinsalze enthalten; Schritt 16	
i) Kumulieren der Steinsalz-Mächtigkeiten; Schritte 17-18	TH_Bohrungen_VBAMakro_kum_Maecht
j) Verbinden der beiden Tabellen und abspeichern als eine Datei; Schritt 19	TH_Bohrungen_VBAMakro_final_kumuliert
k) Eliminieren von Bohrungen mit Mächtigkeiten < 100 m; Schritte 20-21	Auswahl100_TH_Bohrungen_VBAMakro_final_kumuliert
l) Abgleich mit Bohrungsdaten, die außerhalb der ausgewiesenen Fläche liegen; Schritte 22-23	
m) Wo nötig, Erstellung von Puffern um die Bohrungen gemäß Abstand; Schritt 24	Auswahl100_TH_Bohrungen_VBAM
n) Erweiterung der Fläche um die Puffergebiete, Schritt 25	TH_Zechstein_Bearbeitung_final

Tabelle 55: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen in Bayern, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche / Datei
o) Einladen der vorgefilterten Bohrungen mit Steinsalz	Bayern_Bohrungen_Zechstein_gesamt
p) Auswahl aller Bohrungen mit Salz größer als 100 m	Bayern_Bohrungen_Zechstein_ueber100m
q) Erstellen von Puffern mit Radien, die dem Abstand bis zur Thüringer Fläche entsprechen	Bayern_Bohrungen_Zechstein_puffer, Bayern_Bohrungen_Zechstein_puffer2
r) Abgleich mit Salzverbreitung in Ziegler (1989) und Reinhold et al. (2014)	
s) Modifizieren der Pufferflächen über die Karte (Seidel 2013) Werra-Steinsalz und Staßfurt-Steinsalz	BY_Zechstein_Bearbeitung_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 54 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell INFLUINS (Thüringer Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz 2014), welches Teil des Verbundprojekts „Integrierte Fluidynamik in Sedimentbecken“ ist, wurde an der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) in den Jahren 2010 bis 2014 entwickelt. Es deckt das Thüringer Becken ab, welches Teile von Thüringen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt sowie Hessen umfasst und enthält 14 modellierte Horizonte vom Grundgebirge bis zum Känozoikum:

- UK_Kaenozoikum = Basis Känozoikum
- OK_ko = Top Oberer Keuper
- OK_kmSM = Top Mittlerer Keuper
- OK_ku = Top Unterer Keuper
- OK_moC = Top Ceratitenschichten
- OK_moT = Top Trochitenkalk
- OK_mm = Top Mittlerer Muschelkalk
- OK_mu = Top Unterer Muschelkalk
- Ok_so = Top Oberer Buntsandstein
- OK_sm = Top Mittlerer Buntsandstein
- OK_su = Top Unterer Buntsandstein
- OK_z3AN_z7 = Top Zechstein
- UK_z1CA_z1C = Basis Zechstein
- OK_G = Top Grundgebirge

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 54 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Als Bearbeitungsfläche wurde die Basisfläche z1CA_z1C (Basis Werra-Karbonat bis Zechsteinkonglomerat) verwendet (Tabelle 54, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Thüringen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 54, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungs-

fläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 54 Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 54, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Zechstein und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Topflächen des Unteren, Mittleren und Oberen Buntsandstein, des Unteren und Mittleren Muschelkalk, des Trochitenkalk, der Ceratitenschichten, des Unteren, Mittleren und Oberen Keuper, der Basisfläche Känozoikum sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 54, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 54, Nr. 2f).

Falls in dem Bearbeitungsgebiet 3D-gepufferte Störungen vorhanden sind, wird aus dem Verschnitt mit der Bearbeitungsfläche eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wird. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wird berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche werden gelöscht (Tabelle 54, Nr. 2g).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300-1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 54, Nr. 2h).

Die Bearbeitungsfläche Zechstein wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 54, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Die Steinsalzhorizonte im Zechstein umfassen nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im INFLUINS-Modell (Thüringer Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz 2014). Durch die Verwendung von thematischen Karten und Bohrungsdaten wurden Gebiete spezifischer ausgewiesen, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Da das 3D-Modell nur das Thüringer Becken abdeckt, wurde das Vorkommen von Wirtsgesteinen außerhalb des Modellgebiets in Thüringen und Bayern ausschließlich mittels thematischer Karten, Bohrungsdaten und geologischer Informationen spezifiziert.

Alle verwendeten Informationen sind in einem gemeinsamen ArcGIS Pro-Projekt für Thüringen und Bayern zusammengefasst.

Thüringen

Die Auswertung der Mächtigkeitkarten erfolgte in folgenden Schritten (vgl. Tabelle 54):

1. Die Linieninformationen der Mächtigkeitkarten und der Auslaugungslinie des z1NA wurden in Polygone umgewandelt (Tool: „Feature to Polygon“). Dafür mussten offene Linie geschlossen werden. Es gilt das Prinzip des geringsten Abstands, das heißt die Begrenzung wurde auf kürzester Strecke an der nächsten Linie mit Mächtigkeitinformationen (Isopache) geschlossen (Tool: „Features ändern“ – Stützpunkte). Wo keine Isopachen als Begrenzung vorhanden sind, wurde kein Polygon generiert.
2. Angabe von Minimal- und Maximalwerten der Mächtigkeit gemäß der Isopachen für jede Fläche in der Attributtabelle („THICK_min“ und „THICK_max“)
3. Nur für Gebiete, die durch die Karte von 1984 nicht abgedeckt werden, wird die Karte von 1963 verwendet. Dabei handelt es sich um Teile von Sachsen-Anhalt und das Werra-Becken.
4. Zusammenführen der beiden Mächtigkeitkarten (Tool „Anhängen“ von 1963-Karte an 1984-Karte) zu Polygon-Shape z1NA_Maechtigkeit.shp
5. Für z2NA bis z4NA existieren nur Mächtigkeitkarten und Auslaugungslinien von 1963. Diese werden für das gesamte Gebiet herangezogen (Vorgehen wie in Schritten 1-2), da keine neueren Informationen mit ähnlichem Detaillierungsgrad vorliegen.
6. Erstellung und Ablage der Polygon-Shapes z2NA_Maechtigkeit.shp, z3NA_Maechtigkeit.shp und z4NA_Maechtigkeit.shp
7. Vereinigung der vier Mächtigkeit-Shapes (Tool „Union“, Spalten bleiben in den Attributtabelle erhalten): z1_4NA_Maechtigkeit_Union.shp
8. Über das Tool „Feldberechnung“ Addition aller vier THICK_max-Werte zu max_gesamt („Python“)
9. Neue Spalte zur Bewertung hinzufügen: max100 repräsentiert die addierten Werte der THICK_max gruppiert zu kleiner als 100 m („0“) und größer als 100 m („100“); Auflösen der einzelnen Polygone (Tool: „Dissolve“) entsprechend gleicher Werte dieser Spalte (max100)
10. Zusammenfassen aller Felder mit kumulierten Mächtigkeiten größer gleich 100 m und kleiner 100 m: z1_4_max100.shp

Verschneiden der Ergebnisse der Mächtigkeitkarten mit der Fläche aus INFLUINS:

11. Auswählen der Flächen, die Mächtigkeiten größer gleich 100 m aufweisen (z1_4NA_max100_Auswahl.shp)
12. Von der Datei TH_s_z_cut_300m_1500m_thickness_100m.dxf (Ergebnis aus INFLUINS) Polygon-Featureclass einladen, in 2D Shape umwandeln (TH_Zechstein_300_1500_100m_dxf.shp) und enthaltene Dreiecke auflösen (Tool: „Dissolve“: TH_Zechstein_300_1500_100m_dxf_dissolve.shp)
13. Für den durch das 3D-Modell abgedeckten Bereich: Verschneiden des Ergebnisses der Mächtigkeitkarten (vgl. Schritt 10) mit den 3D Informationen: Tool

- „Überschneiden (Intersect)“ mit TH_Zechstein_300_1500_100m_dxf_dissolve.shp. Ablage als Polygon-Shape z1_4_NA_Maechtigkeit_Union_Di.shp
14. Erweitern der Fläche um die Bereiche, die nicht durch das 3D Modell INFLUINS abgedeckt sind (z1_4NA_Maechtigkeit_Union_Erw.shp)
 15. Überprüfen der Außengrenzen mit den aktuellen Mächtigkeitkarten aus (Seidel 2013). Die Auslaugungslinien werden übernommen und als Begrenzung herangezogen (z1_4NA_dxf_Seidel.shp).

Aufbereitung der Bohrungsdaten

Das geologische Landesamt von Thüringen (TLUG) hat Bohrungsdaten in Form von einer Datenbank geliefert (BGE_Anfrage_Bohrungen.mdb; vgl. Tabelle 53, Nr. 4). Für diese Bohrungen werden die Mächtigkeiten Salzhorizonte gemäß folgender Schritte ermittelt:

16. Vorfiltern aller Bohrungen und speichern als: TH__Salz__Auswahl-per-VBA-code_neu20200420_test2.csv
17. Filtern aller Schichten, die entweder als erste Komponente Steinsalz (gemäß Begriffsbestimmung Steinsalz: SG02102/8/1-2020#7, 814795) oder die passende stratigraphische Einheit aufweisen
18. Summieren aller Werte in Spalte „MAECHT“ bei gleicher „bauwerk_nr“ und Kontrolle auf Doppelungen. Dabei entsteht eine neue Shape-Datei.
19. Verbinden der Tabellen über Spalte „bauwerk_nr“. Zur Vereinigung beider Shapes, Exportieren der verbundenen Tabelle und speichern als neues Shape
20. Eliminieren aller Bohrungen mit Steinsalz-Mächtigkeiten kleiner als 100 m. Ablage der restlichen Bohrungen mit Steinsalz-Mächtigkeit größer als 100 m als Polyline-Shape Auswahl100_TH_Bohrungen_VBAMakro_final_kumuliert.shp
21. Bohrungen in Thüringen, die Zechsteinsalze mit mehr als 100 m kumulierter Mächtigkeit antreffen, sind im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete aufgelistet.

Abgleich der Bohrungsdaten mit den Ergebnissen der Mächtigkeitkarten und des 3D-Modells aus INFLUINS (Thüringer Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz 2014):

22. Einladen der nach Salzformationen vorgefilterten Bohrungen
23. Abgleich mit den im Rahmen der vorherigen Schritte erzeugten Flächen: Fast alle Bohrungen plotten innerhalb der Flächen
24. Alle Bohrungen außerhalb der Flächen überprüfen. Verbleibende Bohrungen werden mit Puffern umgeben, die dem Abstand bis zur nächsten ausgewiesenen Fläche entsprechen.
25. Hinzufügen der Puffergebiete zu den erzeugten Flächen (vgl. vorherige Schritte).

Bayern

Die Bearbeitung der Thüringer Daten hat Hinweise geliefert, dass auch in einigen Gebieten in Nordbayern die Zechstein-Steinsalze alle Mindestanforderungen erfüllen können. Daraufhin wurden die für Bayern gelieferten Daten (vgl. Tabelle 53, Nr. 10 bis 12) dahingehend überprüft.

Ein Abgleich mit der paläogeographischen Karte von Ziegler (1989) hat gezeigt, dass im nördlichen Bayern im Anschluss an die Zechstein-Flächen von Thüringen Salze abgelagert wurden. Daher wurden die Bohrungsdaten ausgewertet (Tabelle 55 o). Das geologische Landesamt von Bayern (LfU) hat Bohrungsdaten in Form von zwei Excel-Dateien geliefert (Stammdaten.xlsx, Digitale_Schichtverzeichnisse.xlsx). Daten zu Bohrungen in Bayern, die das Werra-Steinsalz mit Mächtigkeiten größer als 100 m antreffen, sind im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete aufgelistet.

Drei Bohrungen befinden sich nahe der Thüringer Grenze. Zwei dieser Bohrungen, Ostheim 1 und Mellrichstadt (1900), weisen Steinsalzmächtigkeiten von deutlich mehr als 100 m auf (Tabelle 55 p). Dieses wird sowohl durch die Zechstein-Verbreitung aus (Reinhold et al. 2014), als auch durch die paläogeographische Karte von Ziegler (1989) bestätigt, welche bis weit nach Bayern hinein Salzformationen ausweist (Tabelle 55 r).

Daher wurde die Fläche TH_s_f_z_4 entsprechend erweitert (Tabelle 55 q). Dafür wurde für die Bohrungen Mellrichstadt (1900) und Ostheim 1 die Entfernung zur Thüringer Grenze bestimmt, da dort aus der Werra-Steinsalz-Karte von Seidel (2013) noch Steinsalz größer als 100 m ausgegeben wird (Tabelle 55 r). Dieser Abstand wurde als Radius um die Bohrungen gelegt (Tool: „Puffer“). Diese Puffer wurden vereinigt und Löcher eliminiert (Tabelle 55 q).

Die Bohrung Willmars 1, die kein Steinsalz enthält, blieb außerhalb der ausgewiesenen Fläche und markierte die westliche Begrenzung als Verlängerung der westlichen 100 m-Isopache der Werra-Steinsalz-Karte von Seidel (2013). Die östliche Begrenzung erfolgte durch die Verlängerung der östlichen 100 m-Isopache (Tabelle 55 s). Alle neu ausgewiesenen Gebiete liegen innerhalb der von Ziegler (1989) ausgewiesenen salinaren Fazies der Werra-Formation (Tabelle 55 r).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die lithostratigraphischen Einheiten z1NA (Werra-Steinsalz), z2NA (Staßfurt-Steinsalz), z3NA (Leine-Steinsalz) und/oder z4NA (Aller-Steinsalz) haben gemäß den Inventarisierungstabellen für Thüringen und Bayern (siehe Kapitel 5) als Hauptkomponente Halitit, was einem nahezu reinen Steinsalzgestein gleichzusetzen ist.

Da in allen ausgewiesenen Gebieten diese Einheiten verbreitet sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **erfüllt** eingeschätzt.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Die Mächtigkeit des Zechstein wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Zechsteins zusammen.

Für alle Gebiete, die nicht durch das 3D-Modell abgedeckt sind, wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbanken aus Thüringen und Bayern hinsichtlich der Steinsalz-Mächtigkeiten überprüft.

Da sehr viele Bohrungen im Werra-Gebiet und südlich des Thüringer Waldes (siehe Tabelle XX im Anhang) Steinsalz-Mächtigkeiten von 100 m und mehr aufweisen, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als erfüllt betrachtet. Für die Fläche in Bayern sind ausreichend hohe Steinsalz-Mächtigkeiten in den Bohrungen Ostheim und Mellrichstadt (siehe Tabelle YY im Anhang) nachgewiesen.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Die Tiefenlage des Zechstein wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Für alle Gebiete, die nicht durch das 3D-Modell abgedeckt sind, wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbanken aus Thüringen und Bayern hinsichtlich der Tiefenlage der Steinsalz-Horizonte überprüft. Innerhalb der ausgewiesenen Gebiete weisen sehr viele Bohrungen in Thüringen (siehe Tabelle XX im Anhang) Steinsalz in Teufen zwischen 300 und 1500 m auf. Für die Fläche in Bayern sind in den Bohrungen Ostheim und Mellrichstadt (siehe Tabelle YY im Anhang) die Steinsalze der Werra-Formation in passender Teufe angetroffen worden.

Für die verbleibenden Gebiete in Thüringen und Bayern wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Somit werden in allen verbleibenden Gebieten zum jetzigen Zeitpunkt alle Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG als erfüllt eingestuft.

Ergebnis

In Abbildung 29: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Zechstein in Thüringen und Bayern ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Zechstein in Thüringen und Bayern dargestellt.

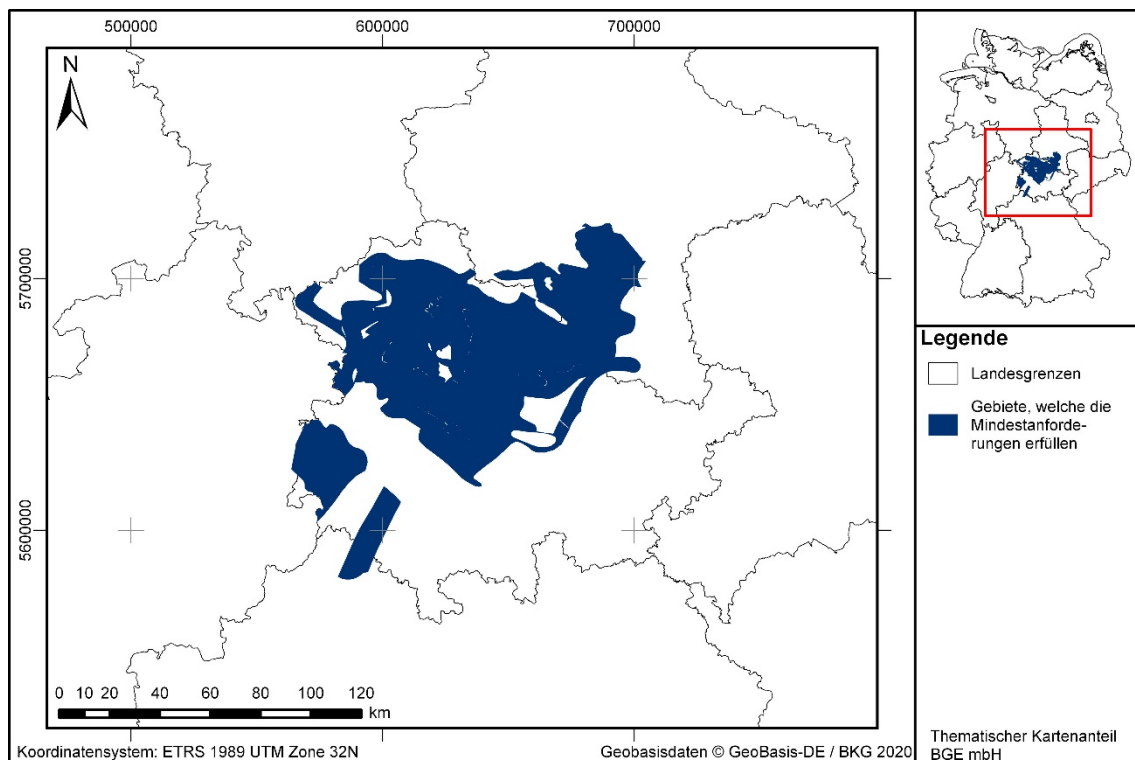


Abbildung 29: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Zechstein in Thüringen und Bayern

Die Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, ziehen sich aufgrund der verwendeten Datenbasis (vgl. Tabelle 53 , Nr. 5 bis 9, Mächtigkeitkarten) bis nach Sachsen-Anhalt, Hessen und Niedersachsen. Im länderübergreifenden Protokoll für Zechstein (BGE 2020j) werden die Ergebnisse mit den Bearbeitungen für diese Bundesländer abgeglichen.

In Abbildung 30 und Abbildung 31 sind beispielhafte Profilschnitte durch das nördliche Thüringer Becken sowie das Werra-Gebiet zu sehen.

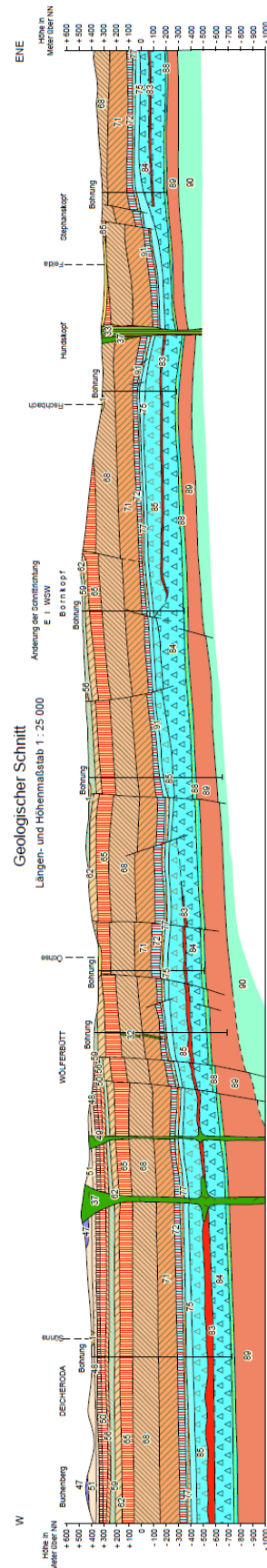


Abbildung 31: Profilschnitt aus der GK25, Blatt 5226 Stadtlengsfeld, im Werra-Becken

Eine Auflistung der Gebiete in Thüringen und Bayern, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 56 zu finden.

Tabelle 56: Auflistung aller Gebiete in Thüringen und Bayern, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
TH_s_f_z_1	6080
TH_s_f_z_2	1012
TH_s_f_z_3	661
TH_s_f_z_4	224
BY_s_f_z_1	138

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 57 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 57: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11840020	912	INFLUINS		Verwendetes 3D-Modell
11844858_01	935	BGE_Anfrage_Bohrungen	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind im Anhang aufgelistet	Bohrdatenbank aus TH
11844858_01	937	II1-2027_1963_An18_z1NA_SUBL	Auslaugungsgrenze z1NA	Die Auslaugungsgrenze z1NA wurde zur direkten Eingrenzung verwendet; die Karte ist im Anhang zu finden
11844858_01	938	II1-2027_1963_An18_z1NA_THICKL	Isopachen z1NA	Mächtigkeitinformation zum Werra-Steinsalz; die Karte ist im Anhang zu finden

DokID	Grup- pen-ID	Name des Da- tensatzes	Entscheidungserhebli- ches Datum aus der Datei	Beschreibung
11844858_01	940	II1-2027_1963_A nI22_z2NA_ SUBL	Auslaugungsgrenze z2NA	Die Auslaugungsgrenze z2NA wurde zur direkten Eingrenzung verwendet; die Karte ist im Anhang zu finden
11844858_01	941	II1-2027_1963_A nI22_z2NA_ THICKL	Isopachen z2NA	Mächtigkeitinformation zum Staßfurt-Steinsalz; die Karte ist im Anhang zu finden
11844858_01	943	II1-2027_1963_A nI26_z3NA_ SUBL	Auslaugungsgrenze z3NA	Die Auslaugungsgrenze z3NA wurde zur direkten Eingrenzung verwendet; die Karte ist im Anhang zu finden
11844858_01	944	II1-2027_1963_A nI26_z3NA_ THICKL	Isopachen z3NA	Mächtigkeitinformation zum Leine-Steinsalz; die Karte ist im Anhang zu finden
11844858_01	946	II1-2027_1963_A nI28_z4NA_ SUBL	Auslaugungsgrenze z4NA	Die Auslaugungsgrenze z4NA wurde Prüfung verwendet; die Karte ist im Anhang zu finden
11844858_01	947	II1-2027_1963_A nI28_z4NA_ THICKL	Isopachen z4NA	Mächtigkeitinformation zum Aller-Steinsalz; die Karte ist im Anhang zu finden
11844858_02	966	II1-3535_1984_A nI04_z1NA_ THICKL	Isopachen z1NA	Mächtigkeitinformation zum Werra-Steinsalz; die Karte ist im Anhang zu finden
11842369_04	4299	Digi- tale_Schicht- verzeichnisse	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 2 aufgelistet	Bohrdatenbank aus BY
11842369_04	4300	Stammdaten	Stammdaten der entscheidungserheblichen Bohrungen	Stammdaten der Bohrdaten aus BY

Zusätzlich wurden die Umrise der Gebiete südlich des Thüringer Waldes und im Osten des Thüringer Beckens durch die Isopachen der Mächtigkeitkarte des Werrasteinsalzes

definiert bzw. modifiziert. Im Norden des Thüringer Beckens wurde dafür die Mächtigkeitkarte Staßfurt Salz verwendet (vgl. Abschnitt „Eigenrecherche“):

1. „Mächtigkeitkarte des Werrasteinsalzes“ Abbildung 4 auf S. 29 (Seidel 2013)
2. „Mächtigkeitkarte Staßfurt Salz“ Abbildung 9 auf S. 37 (Seidel 2013)

1.2.9 Oberer Buntsandstein – Mecklenburg-Vorpommern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Mecklenburg-Vorpommern. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Buntsandstein die Salzformationen der Röt-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend wurden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung war die Ausweisung von Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese wurden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgte eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Oberer Buntsandstein, *Röt-Formation*

Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Der Obere Buntsandstein ist die obere Einheit des Buntsandstein. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Mecklenburg-Vorpommern die Röt-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Oberen Buntsandstein und deren lithologische Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle Mecklenburg-Vorpommern entnommen werden (siehe Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen der Röt-Formation sind in Mecklenburg weit verbreitet. Die östliche Verbreitungsgrenze des Röt-Salinars verläuft in Nordwest-Südost-Richtung von Rostock bis zum Unterlauf der Oder etwa bei Oderberg (Beutler 2004)

Geologische Beschreibung

Die Röt-Formation ist eine lithostratigraphische Einheit im Oberen Buntsandstein der Unteren Trias und bildet den Top des Buntsandstein und grenzt somit an den Muschelkalk. Die Röt-Formation stellt die letzte stratigraphische Folge (s7) der insgesamt 7 Folgen des Buntsandstein dar. Die Röt-Formation lässt sich wiederum in 4 Unterfolgen bzw. Subformationen Röt 1-4 darstellen. Das Salinarröt in Mecklenburg-Vorpommern ist nur in Röt 1 vorzufinden (Röhling 2015; Röhling et al. 2018).

Im zentralen Norddeutschen Becken herrschte während des Oberen Buntsandstein eine evaporitisch-halitisch geprägte Beckenfazieszone, die auf marine Ablagerungsbedingungen hinweist. Im Salinarröt von Mecklenburg-Vorpommern sind lokal Mächtigkeiten von über 100 m anzutreffen (Beutler 2004).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 58). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 58: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BGR	1184487 0_01/ 6815	mpk	Röt_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
2	DE	BKG	1187505 6/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
3	DE	BKG	1186548 2/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
4	DE	BGR	1184487 0_01/681 9	shp	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Umriss der Salzstrukturen aus InSpEE (von Goerne et al. 2016)
5	MV	LUNG	1188666 5/9022	xlsx	LUNG_Daten_Bohrungen_SVZ_BLM_Teil_1	Bohrdatenbank

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
6	MV	LUNG	1188666 5/9022	xlsx	LUNG_Daten_Bohrungen_SVZ_BLM_Teil_2	Bohrdatenbank
7	MV	LUNG	1188877 6/9164	mdb	LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06	Bohrdatenbank
8	MV	LUNG	1184010 4/115	shp	Salz_diapir_MV_Namen	Verbreitungskarte von Salzdiapiren

Bohrungsinformationen

Der staatliche geologische Dienst von Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) hat digitale Schichtenverzeichnisse zur Verfügung gestellt. Diese sind nur für einen Teil aller bekannten Bohrungen vorhanden. Die Bohrungsdaten umfassen Schichtinformationen mit Angaben zu Stratigraphie und/oder Petrographie.

Verbreitungskarte

Im BASAL-Bericht (Reinhold et al. 2014) ist die Karte „Schematische On-shore-Verbreitung der Halit-führenden Röt-Salinare in Deutschland“ (Abb. 15 auf Seite 40) enthalten. Diese erstreckt sich über ganz Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen, Berlin sowie weite Gebiete von Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen, zudem ein Teil von Nordrhein-Westfalen. Für das Röt-Steinsalz sind nur qualitativ die Ablagerungsbereiche ohne Mächtigkeitsinformationen angegeben.

Eigenrecherche

Es wurden keine zusätzlichen thematischen Karten oder andere geologische Informationen aus Eigenrecherche zur Bearbeitung der Mindestanforderungen verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit und Tiefenlage des Röt-Salinars in Mecklenburg-Vorpommern geprüft wurde, ist in Tabelle 59 aufgelistet. Zudem wurden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 59: Vorgehensweise der Bearbeitung zur Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
Integration von 2D geologischen Informationen	
a) ArcGIS Projekt	WG_Salz_stratiform_mm_so_MV

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Thematische Karte einladen (Reinhold et al. 2014)	Palaeogeogr_soSR
c) Verbreitungskarten der Salzstrukturen (Salzstoecke) und Diapire einladen (von Goerne et al. 2016)	Salzstrukturen_Inspee_v1_poly Salzstoecke Salz_diapir_MV_Namen
d) Bohrdaten einladen	Alle_Bohrungen_MV
e) Bohrungen in Salzstoecken entfernen	Alle_Bohrungen_MV_ausserhalb_Salzstoecke
f) Bohrungen filtern nach Stratigraphie und Petrographie	Bohrungen_so_na
g) Prüfung auf Suchteufe (300 m bis 1500 m)	Bohrungen_so_na_ausserhalb_MA Bohrungen_so_na_innenhalb_MA
h) Prüfung auf Mindestanforderung (Mächtigkeit größer gleich 100 m)	Bohrungen_so_na_innenhalb_MA_geringmaechtig Bohrungen_so_na_innenhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m

Bearbeitung im 3D-Modell

Da für das zu bearbeitende Gebiet kein 3D-Modell vorlag, wurde das Vorkommen von Salzformationen des Oberen Buntsandstein mittels thematischer Karten, geologischen Informationen und Bohrungsdaten spezifiziert.

2D-Bearbeitung

Alle verwendeten Informationen wurden in einem ArcGIS-Projekt zusammengefasst. Die Auswertung der aufgeführten Daten erfolgte gemäß der im Folgenden aufgeführten Schritte.

Bohrungsaufbereitung

Die Bohrungsdaten umfassen die Basis des Rotliegenden bis zum Top des Mittleren Keuper. Alle Salzhorizonte von Zechstein bis Mittlerer Keuper in den Bohrdaten wurden bereits in der Excel-Tabelle vorgefiltert und zur Verfügung gestellt. In der Excel-Tabelle der Bohrungsdaten (s. o.) wurde der vorgefilterte „Salz FILTER“-Datensatz ausgewählt. Die Filterauswahl erfolgte dann nach der entsprechenden Stratigraphie (Oberer Buntsandstein) und nach Petrographie gemäß Begriffsdefinition. Wichtig hierbei war, dass die Hauptkomponente entweder Steinsalz (^na) ist oder andere Gesteinsarten, die überwiegend Steinsalz enthalten (siehe Begriffsbestimmung). Alle relevanten Steinsalzhorizonte wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Wenn in einer Bohrung mehrere Salzhorizonte vorkamen, wurden die Mächtigkeiten kumuliert und in einer neuen Tabelle dargestellt.

Bewertung der Salzmächtigkeit

Die Excel-Tabelle mit den Bohrungsdaten von Mecklenburg-Vorpommern wurde in ein GIS-Projekt (WG_Salz_stratiform_mm_so_MV) eingeladen. Dieses Projekt wurde mit der Bearbeitung der Mindestanforderungsgebiete für stratiformes Muschelkalk-Steinsalz in Mecklenburg-Vorpommern zusammengefasst und bekam daher die o. g. Bezeichnung. Zunächst wurde aus dem Shape Salzstrukturen_Inspee__v1_poly ein Shape mit allen Salzstöcken erstellt (Shape: Salzstoecke). Im GIS-Projekt wurden sodann alle Daten eingeladen, die in Tabelle 58 aufgelistet sind (Tabelle 59 a – d). Dann wurden alle vorgefilterten Bohrungen, die in den Diapiren bzw. vertikalen Salzstrukturen (Shape: Salzstoecke) vorkommen, aussortiert und die Bohrungen mitgeführt, die sich außerhalb der Salzstöcke befinden (Select by location; Shape: Alle_Bohrungen_MV_ausserhalb_Salzstoecke) (Tabelle 59 e). Basierend auf diesem Shape, wurden die Bohrungen nach Stratigraphie (Oberer Buntsandstein) und Petrographie (^na) gefiltert und selektiert (Select by attributes; Shape: Bohrung_so_na) (Tabelle 59 f). Für eine bessere Übersicht geschah dies in den Attribut-Tabellen der Bohrungen. Diese Bohrungen wurden sodann auf die Salz-Mächtigkeit überprüft, da keine Depth_from-Werte gegeben sind und der Depth_to- Wert der darüber liegenden Schicht der jeweiligen Bohrung entscheidend ist (Tabelle 59 h).

Nachdem man die Mächtigkeiten der Salzsichten ermittelt hat, wurden diejenigen aussortiert, die sich außerhalb der Mindestanforderungstiefen (kleiner als 300 m; größer als 1500 m) befinden (Shape: Bohrung_so_na_ausserhalb_MA) (Tabelle 59 g). Die Daten, die sich innerhalb des Mindestanforderungsfensters (300–1500 m; Shape: Bohrung_so_na_innerhalb_MA) befinden, wurden in zwei Shapes unterteilt, die jeweils einmal die Salzsichten repräsentieren, die einmal geringmächtiger sind als 100 m (Shape: Bohrung_so_na_ausserhalb_MA_geringmaechtig) und einmal mächtiger als 100 m (Shape: Bohrung_so_na_ausserhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die Röt-Formation enthält gemäß der Inventarisierungstabelle für Mecklenburg-Vorpommern (Kapitel 5) Steinsalzhorizonte mit der Hauptkomponente Halitit, was einem nahezu reinen Steinsalz gleichzusetzen ist.

Es wurden im ganzen Landesgebiet von Mecklenburg-Vorpommern in drei Bohrungen mit Schichtenverzeichnissen Steinsalze im Teufenbereich 300 bis 1500 m gefunden:

- E Parchim 1/1968 (Mächtigkeit 145 m, Teufe Top: 1120 m)
- E Marnitz 6/6A/1960 (Mächtigkeit 63 m, Teufe Top: 1030 m)
- E Lübtheen 1/1971 (Mächtigkeit 73 m, Teufe Top: 814 m)

In den Bohrungen Marnitz und Lübtheen wurden reine Steinsalze angetroffen. Der Salzhorizont in der Bohrung Parchim 1/1968 ist dadurch charakterisiert, dass er nicht aus reinem Halit besteht, sondern aus einer Vergesellschaftung von verschiedenen Mineralen. Während es sich bei der Hauptkomponente um Halit handelt, sind die Sekundärkomponenten Anhydrit und Beimengungen von wechsellagerndem Tonstein. Eine weitere Differenzierung für diesen Salzhorizont hinsichtlich der Mächtigkeit der Sekundärkomponenten ist nicht bekannt. Im Hangenden sind Karbonat und Tonsteinschichten und im Liegenden Ton-, Schluff- und Feinsandsteinschichten, die jeweils Mächtigkeiten bis über 100 m erreichen können. Da keine näheren Angaben zu dem Salzhorizont vorliegen und es nicht bekannt ist, wie mächtig die wechsellagernden Tonschichten sowie die Anhydritbänke sind, bleibt die sichere Beurteilung dieses Salzhorizonts im Hinblick auf Gebirgsdurchlässigkeit zweifelhaft.

Die überregionale petrologische Zusammensetzung des Röt-Salinars in Mecklenburg-Vorpommern ist nicht bekannt und kann überwiegend entweder der Zusammensetzung in Parchim oder der rein halitischen Ausbildung der anderen beiden Bohrungen (s. o.) entsprechen.

Daher wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ insgesamt als **potenziell erfüllt** eingeschätzt.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Für alle Gebiete wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbanken aus Mecklenburg-Vorpommern hinsichtlich der Steinsalz-Mächtigkeiten überprüft.

Lediglich in einer Bohrung mit Schichtenverzeichnis (Bohrung E Parchim 1/1968, welche im Süden von Mecklenburg-Vorpommern lokalisiert ist) wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ nachweislich erfüllt. Alle anderen vorliegenden Bohrungen weisen keine Steinsalz-Mächtigkeiten von mindestens 100 m auf. In der Bohrung E Parchim 1/1968 beginnt das Steinsalz in einer Tiefe von 1120 m und endet bei 1265 m. Dementsprechend hat es eine Mächtigkeit von insgesamt 145 m (s.o.). Es ist jedoch weiterhin zweifelhaft, ob es sich bei dem entsprechenden Salzhorizont um eine ausreichend mächtige und aus reinem Salz bestehenden Horizont handelt, da Ton- und Anhydrit-Wechsel- bzw. Zwischenlagerungen bekannt sind.

Daher wird die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **nur regional potenziell erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Im ganzen Landesgebiet von Mecklenburg-Vorpommern gibt es insgesamt drei Bohrungen mit Schichtenverzeichnis, die Salzsichten aufweisen, die die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ erfüllen: Marnitz 6/6A/1960, Lübtheen 1/1971 und Parchim 1/1968 (s.o.).

Demzufolge kann die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für diese Regionen als **erfüllt** betrachtet werden.

Zusammenfassende Beurteilung

In Mecklenburg-Vorpommern sind stratiforme Steinsalze des Röt-Salinars im Oberen Buntsandstein in der Tiefenlage zwischen 300 m bis 1500 m unter Geländeoberkante in einigen Bohrungen ermittelt worden. Nach der umfassenden Bohrungsaufbereitung und der Mindestanforderungsbearbeitung konnten nur in einer einzigen Bohrung, Parchim 1/1968, Steinsalze in der Mindestanforderungstiefe und der erforderlichen Mächtigkeit von mind. 100 m identifiziert werden. Geringmächtige Steinsalzsichten wurden mit 63 m in Marnitz 6/6a/1960 und 73 m in Lübtheen 1/1971 ermittelt.

Die Bohrung Parchim 1/1968 befindet sich innerhalb einer Salzstruktur (Salzkissen), die eine Flächengröße von ca. 335 km² hat. Die Bohrung Marnitz 6/6a/1960 liegt in unmittelbarer Nähe von Parchim. Alle drei Bohrungen befinden sich im paläogeographischen Verbreitungsraum des Röt-Salinars. Während jedoch die geringmächtigeren Schichten aus reinem Steinsalz bestehen, ist in dem Salzhorizont in der Bohrung Parchim Anhydrit und wechsellagernder Tonstein vorzufinden. Es handelt sich demnach nicht um reines Halit, weshalb die Erfüllung der Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ zweifelhaft ist. Im Hinblick auf weitere Entscheidungskriterien, ist auch die Tatsache zu beurteilen, dass insgesamt nur eine einzige Bohrung, nämlich Parchim 1/1968 die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ überhaupt erfüllt und in unmittelbarer Nähe bereits die Steinsalz-Mächtigkeit nachgewiesenermaßen zu gering ist. Daher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es ein Gebiet gibt, das über mindestens 3 km² alle Mindestanforderungen erfüllt, **als unwahrscheinlich** einzustufen.

Aufgrund dieser Ergebnisse sind nicht alle Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllt.

Damit entfällt eine weitere Bearbeitung des Röts in Mecklenburg-Vorpommern und es werden keine Gebiete identifiziert. Somit kann auf die Beurteilung der Mindestanforderungen „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4) und „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5) verzichtet werden.

Ergebnis

In Abbildung 32 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Oberer Buntsandstein (Röt) in Mecklenburg-Vorpommern dargestellt. Es wurden keine Gebiete, die alle Mindestanforderungen erfüllen, identifiziert.

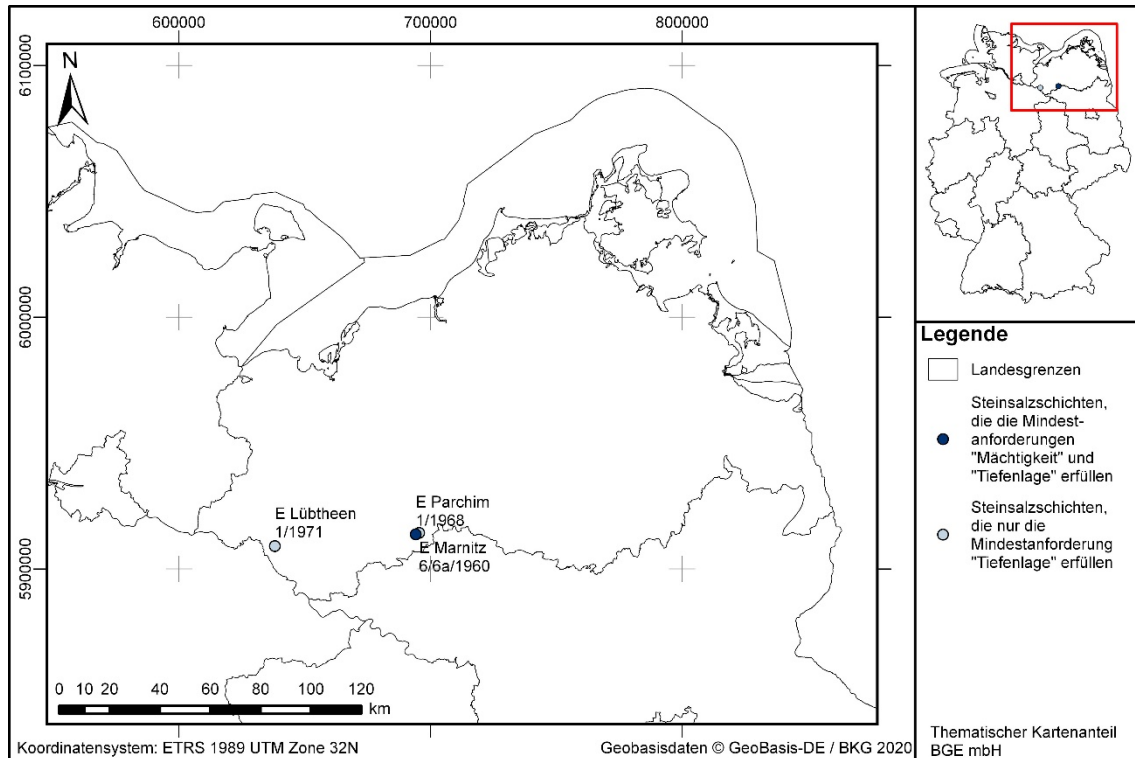


Abbildung 32: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Oberen Buntsandstein (Röt) in Mecklenburg-Vorpommern

Der Profilschnitt in Abbildung 33 veranschaulicht einen geologisch-tektonischen Schnitt von der variszischen Außenzone über die Rügen-Kaledoniden bis zum Südwestrand Balticas.

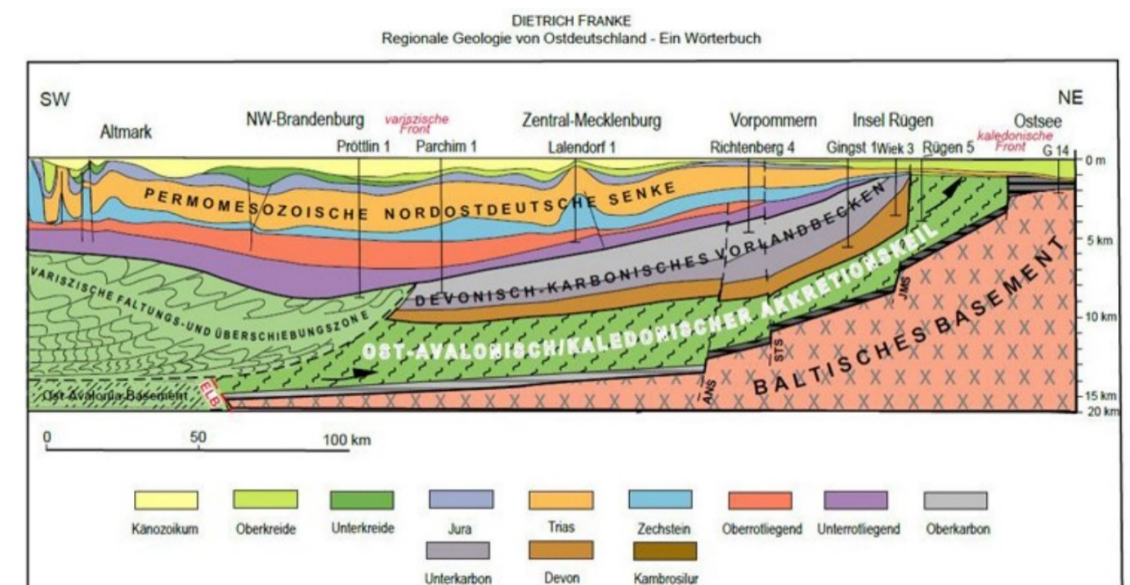


Abbildung 33: Ausschnitt aus dem SW-NE-Profileschnitt durch Mecklenburg-Vorpommern (Franke et al. 2015b)

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 60 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 60: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11888776	9164	LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgelistet	Bohrdatenbank
11844870_01	6819	Salzstrukturen_Inspee_v1_poly	Salzkissen	Die Umrisse wurden zur Identifizierung von Salzkissenstrukturen verwendet
11844870_01	6815	Röt-Salinar	Verbreitungsgrenze	Die Verbreitungsgrenze des Röt-Salinars wurde als Bewertungsgrundlage zur Grenzziehung herangezogen

1.2.10 Oberer Buntsandstein – Niedersachsen, Bremen, Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Niedersachsen, Bremen und Hamburg. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Buntsandstein die Salzformationen der Röt-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend wurden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung war die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese wurden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgte eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Oberer Buntsandstein, Lithostratigraphie: *Röt-Formation*

Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Der Obere Buntsandstein ist die obere Einheit des Buntsandstein. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Niedersachsen, Bremen und Hamburg die Röt-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Oberen Buntsandstein und deren lithologische Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle Niedersachsen entnommen werden (siehe Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen der Röt-Formation sind überall in Niedersachsen verbreitet, mit Ausnahme von Gebieten bei Osnabrück, im Südwesten Niedersachsens sowie bei Goslar, Holzminden, Göttingen und Northeim im Südosten Niedersachsens (Boy et al. 2005; Reinhold et al. 2014).

Geologische Beschreibung

Die Röt-Formation ist eine lithostratigraphische Einheit im Oberen Buntsandstein der unteren Trias und bildet den Top des Buntsandstein und grenzt somit an den Muschelkalk. Die Röt-Formation stellt die letzte stratigraphische Folge (s7) der insgesamt 7 Folgen des Buntsandstein dar (Perm-Trias Subkommission der deutschen stratigraphischen Kommission 2016). Die Röt-Formation lässt sich wiederum in 4 Unterfolgen bzw. Subformationen Röt 1-4 darstellen (Hinze 1967). Das Röt-Salinar im Nordwestdeutschen Becken ist in Unteres Röt-Salinar (Röt 1-Subformation) und Oberes Röt-Salinar zu unterteilen (Röt 2-Subformation), die jeweils eine zyklische Abfolge aus Basis-Anhydrit, Salinar und Deckanhydrit aufweisen (Röhling 1991). In der Fazieszone der zentralen Beckenbereiche sind z. T. mächtige Evaporitabfolgen abgelagert, demzufolge ist vor allem der Ablagerungsraum des Norddeutschen Beckens evaporitisch geprägt und es sind mächtige Anhydrit- und Steinsalzabfolgen, z. T. Karbonate zu verzeichnen (Beutler 2004; Röhling et al. 2018).

Die Röt-Formation hat in Niedersachsen maximale Mächtigkeiten von bis zu 300 m (Horn-Graben, Helgoland Senke, Glückstadt-Graben). Die Steinsalzmächtigkeiten im Norddeutschen Becken liegen bei etwa 150 bis 170 m (Reinhold et al. 2014).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 61). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 61: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	NI	LBEG	1184229 5/7775	ts	BGE-GTA3D	3D-Modell (Bombien et al. 2012)
2	DE	BGR	1184487 0_01/ 6815	mpk	Röt_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
3	DE	BKG	1187505 6/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
4	DE	BKG	1186548 2/8853	ASCII	DGM200	Digitales Gelände-Modell

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
5	DE	BGR	1184487 0_01/68 19	shp	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Umriss der Salzstrukturen (von Goerne et al. 2016)
6	NI	LBEG	1188151 4/9105	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 1. Teil	Bohrdatenbank
7	NI	LBEG	1188151 4/9105	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 2. Teil	Bohrdatenbank

Bohrungsinformationen

Der staatliche geologische Dienst von Niedersachsen (LBEG) hat digitale Schichtenverzeichnisse zur Verfügung gestellt. Diese sind nur für einen Teil aller bekannten Bohrungen vorhanden. Die Bohrungsdaten umfassen Schichtinformationen mit Angaben zu Stratigraphie und/oder Petrographie.

Verbreitungskarte

Im BASAL-Bericht (Reinhold et al. 2014) ist die Karte „Schematische On-shore-Verbreitung der Halit-führenden Röt-Salinare in Deutschland“ (Abb. 15 auf Seite 40) enthalten. Diese erstreckt sich über ganz Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen, Berlin sowie weite Gebiete von Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen, zudem ein Teil von Nordrhein-Westfalen. Für das Röt-Steinsalz sind nur qualitativ die Ablagerungsbereiche ohne Mächtigkeitsinformationen angegeben.

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 61 genannten Eingangsdaten wurde folgende thematische Karte verwendet:

- Boy et al. (2005): „Geologie von Rheinland-Pfalz“ (Abb. 62 auf Seite 127).

Diese paläogeographische Karte behandelt den Buntsandstein in Mitteleuropa sowie dessen Lithologie. Das Röt-Salinar erstreckt sich über ganz Norddeutschland. Die Verbreitungsfläche wird Richtung Süden schmaler und endet im südlichen Zentraldeutschland.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Röt-Salinars in Niedersachsen geprüft wurde, ist in Tabelle 62 aufgelistet. Zudem wurden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 62: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Röt-Muschelkalk aus der Basisfläche Röt-Muschelkalk 14_so-m (aus allen Kacheln)	b_Röt-Muschelkalk_NI.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Röt-Muschelkalk_NI_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Röt-Muschelkalk_NI_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_so-m_NI.dxf MG_s_so-m.txt
3. Integration von 2D geologischen Informationen	
a) ArcGIS Projekt	WG_Salz_stratiform_so_SH

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Vektorisieren der paläogeographischen Karte (Boy et al. 2005)	LGB_2005_Palaeo_Steinsalz_Roet
c) Salzvorkommen aus den paläogeographischen Karten miteinander verschneiden (Boy et al. 2005; Reinhold et al. 2014)	LGB_BGR_Intersect
d) Modellfläche von Niedersachsen anhand der Bohrinformationen (bei Rehden) ergänzen	Dissolved_Layer_NI + Dissolved_Layer_Rehden = Dissolved_Layer_NI_Rehden_merged
e) Salzvorkommen mit der Modellfläche verschneiden	LGB_BGR_Dissolved_Layer_Intersect
f) Salzstöcke (InSpEE) eliminieren (von Goerne et al. 2016)	LGB_BGR_Dissolved_Layer_erase_Salzstoecke
g) Flächen kleiner als 3 km ² entfernen	LGB_BGR_Dissolved_Layer_erase_Salzstoecke_cut_3squarekm
h) Bohrdaten einladen	Alle_Bohrungen_NI_so
i) Bohrungen filtern nach Stratigraphie u. Petrographie	Alle_Bohrungen_soSR_Na
a. Stratigraphie oder Petrographie stimmt mit Mindestanforderung überein	Alle_Bohrungen_soSR_Na_strat_o_petro_erwiesen
b. Stratigraphie und Petrographie stimmen mit Mindestanforderung insgesamt überein	Alle_Bohrungen_soSR_Na_insgesamt_erwiesen
c. Kumulierte Mächtigkeiten größer als 100 m, innerhalb Mindestanforderungsfenster, Petrographie und Stratigraphie stimmen mit Mindestanforderung überein	so_Kumulierte_Maechtigkeiten_insgesamt_erwiesen_innerhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m
j) Prüfung auf Suchteufe (300 m bis 1500 m)	Alle_Bohrungen_soSR_Na_strat_o_petro_erwiesen_innerhalb_MA Alle_Bohrungen_soSR_Na_insgesamt_erwiesen_innerhalb_MA
k) Prüfung auf Mindestanforderung (Mächtigkeit größer gleich 100 m)	Alle_Bohrungen_soSR_Na_strat_o_petro_erwiesen_innerhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m Alle_Bohrungen_soSR_Na_insgesamt_erwiesen_innerhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 62 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell basiert auf den Daten des Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = Digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tpl = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg ab, sowie weite Teile von Niedersachsen bis auf den südlichen Bereich ab Höhe Göttingen. Die Flächen des GTA3D sind in 42 Kacheln untergliedert.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 62 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen Kachel-weise vor, daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Röt-Muschelkalk Basisflächen (14_so-m) erzeugt (Tabelle 62, Nr. 2b). Allerdings sind an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermaschung) offenkundig.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 62, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 62, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 62, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Röt-Muschelkalk (14_so-m) und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Keuper, Lias, Dogger, Oberjura und Wealden, der Unter- sowie Oberkreide, des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 62, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 62, Nr. 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300–1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 62, Nr. 2h). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Röt-Muschelkalk (14_so-m) wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 62, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Die Salzformationen des Oberen Buntsandstein umfassen nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell des Landes Niedersachsen.

Durch die Verwendung thematischer Karten und Bohrungsinformationen können Gebiete über die Auswertung des 3D-Modells hinaus spezifischer ausgewiesen werden, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auswertung der aufgeführten Daten erfolgt gemäß der im Folgenden aufgeführten Schritte.

Bohrdaten

Alle Salzhorizonte wurden vorgefiltert und als Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt: NI_Auswahl-per-VBA-code_Oberer_Buntsandstein_200604.

In der Excel-Tabelle der Bohrungsdaten wurde der vorgefilterte „Salz FILTER“-Datensatz ausgewählt. Die Filterauswahl erfolgte dann nach der entsprechenden Stratigraphie (Oberer Buntsandstein) und nach Petrographie gemäß Begriffsdefinition. Wichtig hierbei war, dass die Hauptkomponente entweder Steinsalz (^{na}) ist, oder andere Gesteinsarten, die überwiegend Steinsalz enthalten (siehe Begriffsbestimmung). Alle relevanten Steinsalzhorizonte wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Wenn in einer Bohrung mehrere Salzhorizonte vorkamen, wurden die Mächtigkeiten kumuliert. Dafür wurden vorerst alle Schichten eliminiert, die sich außerhalb der Suchteufe (kleiner als 300 m und größer als 1500 m) befanden. Für die Kumulation wurden die folgenden Schritte in Excel durchgeführt:

In Spalte A waren die Lokationsnamen der Bohrungen und in Spalte B die Mächtigkeiten eingetragen. Die folgende Formel wurde benutzt:

```
=SUM(IF(FRE-  
QUENCY(IF($A$2:$A$300=D2,MATCH($B$2:$B$300,$B$2:$B$300,0)),ROW($B$  
2:$B$300)-ROW($B$2)+1),$B$2:$B$300))
```

Spalte A beinhaltet die Werte für die Kondition. Spalte B beinhaltet die Werte, die zu kumulieren waren. In Spalte D wurde die Kondition eingetragen (also alle Lokationsnamen nur einmal) und das wurde benutzt, um die Mächtigkeiten in Spalte B zu addieren. In Spalte E wurde die Formel eingefügt, z. B. Zelle E2 und Strg + Shift + Enter. Dann wurde Zelle E2 selektiert und an der untersten rechten Ecke wurde das Kreuzchen nach unten geschoben, soweit Einträge in Spalte D vorhanden waren.

Die kumulierten Mächtigkeiten wurden in einer separaten Excel Tabelle kalkuliert.

Auswertung der thematischen Karten

Zuerst wurde die paläogeographische Karte (Boy et al. 2005) vektorisiert und als Shape abgelegt (Shape: LGB_2005_Palaeo_Steinsalz_Roet) (Tabelle 62, Nr. 3b). Die bereits georeferenzierten thematischen Karten wurden dann in ein GIS-Projekt (WG_Salz_stratiform_so_NI) eingeladen (Tabelle 62, Nr. 3a). Als Nächstes wurde die Basis-Fläche (DXF-Fläche) als Polygon-Featureclass eingeladen und in ein 2D-Polygon-Shape konvertiert (Tool: Dissolve (Dissolve-Feld: Layer, Shape: Dissolved_Layer_NI). Dann wurde das 2D-Polygon-Shape mit den thematischen Karten verschnitten (Tool: Intersect; Shape: LGB_BGR_Dissolved_Layer_Intersect) (Tabelle 62, Nr. 3c, e). So-

dann wurden die Salzstöcke (Shape: *Salzstrukturen_Inspee_v1_poly*) innerhalb der Modellfläche entfernt (Tool: Erase, Shape: *LGB_BGR_Dissolved_Layer_erase_Salzstoecke*) (Tabelle 62, Nr. 3f).

Nachdem die Bewertung der Salzmächtigkeit bereits erfolgt war (siehe nachfolgende Auswertung) wurden alle Flächen eliminiert, die kleiner waren als 3 km², außer diejenigen, die an Nachbarländer grenzten (Tools: Explode Multipart Feature, Calculate Geometry in Spalte *shape_area*, Definition Query: *Shape_Area* >= 3000000; Shape: *LGB_BGR_Dissolved_Layer_erase_Salzstoecke_cut_3squarekm*) (Tabelle 62, Nr. 3g).

Bewertung der Salzmächtigkeit

Die Tabelle mit den Bohrungsdaten von Niedersachsen wurde als Shape-Datei in das GIS-Projekt eingeladen. Sodann wurden alle Daten hinzugefügt, die in Tabelle 61 aufgelistet sind (Tabelle 62, Nr. 3h). Um die Schichten, die man bei der Bohrungsaufbereitung geprüft hat, weiter zu selektieren, wurden diese nach Stratigraphie (Oberer Buntsandstein) und Petrographie ([^]na) gefiltert (Select by attributes; Shape: *Alle_Bohrungen_NI_so*) (Tabelle 62, Nr. 3i). Für eine bessere Übersicht jedoch wurde in den Attribut-Tabellen der Bohrungen selektiert und gefiltert. Die Schichten ohne Angaben zu einem der Kriterien wurden zunächst in die nächste Filterauswahl mitgeführt. Hierbei wurden alle Stratigraphien (*soT*, *so3*, *so4*) aussortiert, in denen Röt-Salinar nicht zu erwarten war. Die Schichten ohne Angaben zu einem der Kriterien wurden zunächst in die nächste Filterauswahl mitgeführt (z. B. auch Evaporit als Mineralname). Dann wurden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen, in denen Steinsalzhorizonte gemäß Mindestanforderungen vorkommen konnten, wobei die zweite Möglichkeit, die sichere war:

1. Alle Schichten, für die entweder Stratigraphie oder Petrographie erwiesen waren (Shape: *Alle_Bohrungen_soSR_Na_strat_o_petro_erwiesen*) oder
2. Nur die Schichten werden in Betracht gezogen, für die sowohl die passende Stratigraphie als auch die Petrographie erwiesen waren (Shape: *Alle_Bohrungen_soSR_Na_insgesamt_erwiesen*).

Zusätzlich wurde die Möglichkeit mit den kumulierten Mächtigkeiten gemäß Mindestanforderungen berücksichtigt (Shape: *so_kumulierte_Maechtigkeiten_insgesamt_erwiesen_gleich_o_maechtiger_100m*). Auch bei den kumulierten Mächtigkeiten musste die 1. Möglichkeit in Betracht gezogen werden. Da kumulierte Mächtigkeiten jedoch keinen zusammenhängenden Steinsalzhorizont bilden, wurde von der 2. Möglichkeit, d. h. der erwiesenen Stratigraphie und Petrographie ausgegangen.

Nachdem man die Mächtigkeiten der Salzsichten ermittelt hat, wurden die Salzhorizonte eliminiert, die sich außerhalb der Mindestanforderungstiefen (kleiner als 300 m; größer als 1500 m) befanden und die restlichen wurden beibehalten (Shape: *..._innerhalb_MA*) (Tabelle 62, Nr. 3j). Die Daten, die sich innerhalb des Mindestanforderungsfensters befanden, wurden in zwei Shapes unterteilt, die jeweils einmal die Salzsichten repräsentierten, die einmal geringmächtiger waren als 100 m (Shape: *..._geringmaechtig*) und einmal mächtiger waren als 100 m (Shape: *..._gleich_o_maechtiger_100m*) (Tabelle 62, Nr. 3k).

Im Bereich der Bohrungen Rehden T2, 24, 26, 36, die in der endlagerrelevanten Tiefe auf Salz in flacher Lagerung hinweisen, wurde keine Fläche aus dem GTA3D ausgewiesen. Ein Abgleich verschiedener Datenquellen hat ergeben, dass die resultierende Fläche, die die Mindestanforderungen „Tiefenlage“ und „Mächtigkeit“ erfüllen könnte, zu klein ist (Tabelle 62, Nr. 3d).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an. Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die lithostratigraphische Einheit *Röt-Formation* hat gemäß der Inventarisierungstabelle für Niedersachsen eine evaporitische Fazies mit z. T. mächtigen Abfolgen im zentralen Beckenbereich. Die geographische Verbreitung der Röt-Formation in Niedersachsen ist dem Norddeutschen Becken zuzuordnen, in dem Steinsalzabfolgen mit Mächtigkeiten bis zu 170 m vorkommen (vgl. „Geologische Beschreibung“). Da in allen ausgewiesenen Gebieten die Röt-Formation in salinärer Fazies verbreitet ist, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ in den verbleibenden Gebieten in Niedersachsen als **erfüllt** eingeschätzt.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Die Mächtigkeit des Schichtpakets Röt bis Muschelkalk wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die stratigraphischen Einheiten des Röt und des gesamten Muschelkalk zusammen.

Darüber hinaus wird die Erfüllung dieser Mindestanforderung in den durch den GTA3D ausgewiesenen Gebieten durch Bohrungsdaten nachgewiesen, die mehrfach Salzmächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen. Dazu gehören folgende vier Bohrungen mit Mächtigkeiten größer als 100 m sowie Angaben zu Stratigraphie und Petrographie:

- Bentheim 12: ca. 263 m Mächtigkeit, 982 m Basistiefe
- Schuettorf 1 (2.): 213 m Mächtigkeit, 1012 m Basistiefe
- Velpke-Asse-Devon 1 (1.): 120,5 m Mächtigkeit, 751,5 m Basistiefe
- B19 – Helmuth, Bünsen: 106 m Mächtigkeit, 540 m Basistiefe

Die Mächtigkeiten größer als 100 m in den ausgewiesenen Gebieten, bei denen nur Angaben zu Stratigraphie oder Petrographie bekannt sind, erreichen eine Gesamtzahl von 49.

Für alle Gebiete in Südniedersachsen, die außerhalb der ausgewiesenen Flächen liegen oder nicht durch das 3D-Modell abgedeckt sind, wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbank aus Niedersachsen hinsichtlich der Salzmächtigkeiten überprüft.

In Anbetracht der drei Möglichkeiten sind folgende Ergebnisse entstanden:

- a. Für Mächtigkeiten größer als 100 m, Stratigraphie und Petrographie:
 - Rehden S123 (1./2.): 102,5 m Mächtigkeit in 1466 m u. GOK Basistiefe
 - Salzgitter 1: 101 m Mächtigkeit in 332 m u. GOK Basistiefe
 - B9-Sudheim-II: 116,5 m Mächtigkeit in 716 m u. GOK Basistiefe
- b. Für Mächtigkeiten größer als 100 m, Stratigraphie oder Petrographie:
 - 25 Bohrungen (davon 7 Bohrungen in Rehden)
- c. Für kumulierte Mächtigkeiten größer als 100 m und Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m:
 - B9–Sudheim-II: kumulierte Mächtigkeit: 231,5 m, max. Tiefe 837,5 m u. GOK

Zusammenfassend geht aus den Ergebnissen hervor, dass Steinsalz-Mächtigkeiten größer als 100 m in Südniedersachsen existieren können (siehe Tabelle XX im Anhang).

Daher wird in allen ausgewiesenen Gebieten die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Die Tiefenlage des Schichtpakets Röt bis Muschelkalk (14_so-m) wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Demzufolge wird in allen ausgewiesenen Gebieten mit GTA-3D-Abdeckung die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** eingestuft. Diese Vermutung wird durch die durch die Bohrungsdaten, die Steinsalzen in der entsprechenden Tiefenlage aufweisen, bekräftigt. Dazu gehört z. B. die Auflistung in Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“.

Für alle Gebiete, die nicht durch das 3D-Modell abgedeckt sind, wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbank aus Niedersachsen hinsichtlich der Tiefenlage der Steinsalz-Horizonte überprüft.

Da innerhalb der ausgewiesenen Gebiete sehr viele Bohrungen in Niedersachsen (siehe Tabelle XX im Anhang) Steinsalz in Teufen zwischen 300 und 1500 m aufweisen, wird die Erfüllung der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der Identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Somit sind in allen resultierenden Gebieten zum jetzigen Zeitpunkt alle Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllt.

ErgebnisIn Abbildung 34 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Oberer Buntsandstein (Röt) in Niedersachsen dargestellt.

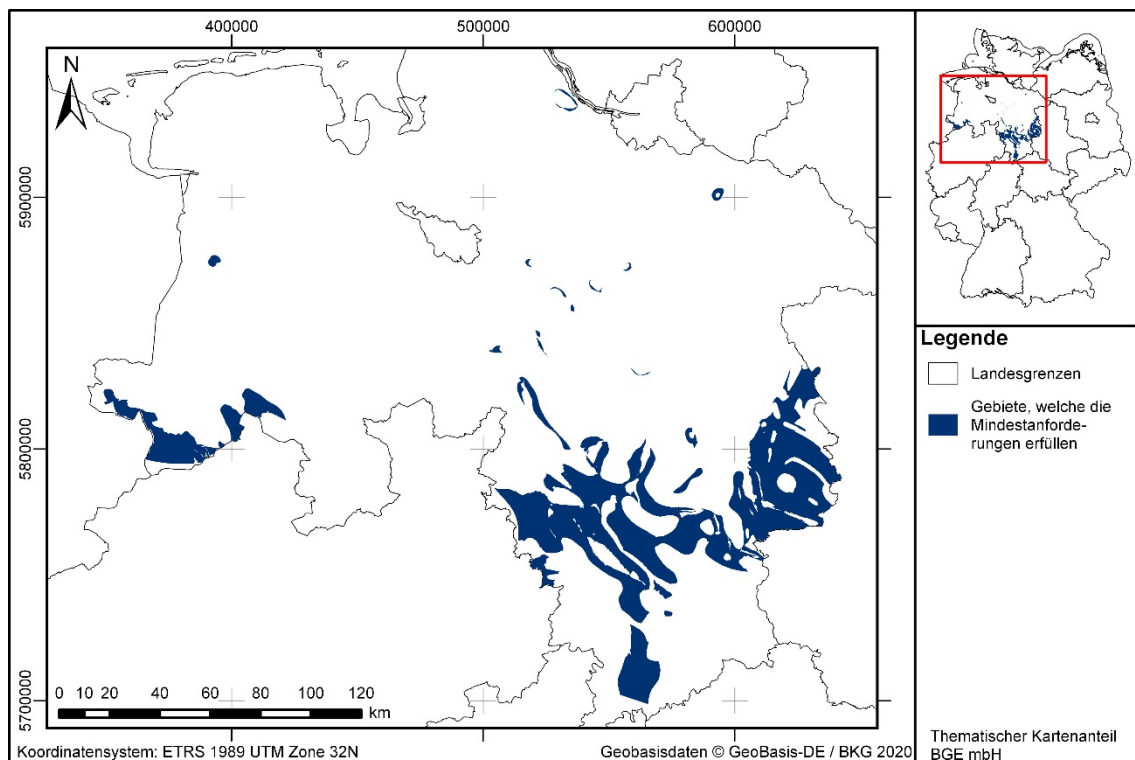


Abbildung 34: *Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Oberen Buntsandstein (Röt) in Niedersachsen, Bremen und Hamburg*

Der Profilschnitt in Abbildung 35 veranschaulicht einen geologischen Schnitt von der Elbe bis zu den südlich von Hannover liegenden Höhenzügen sowie ein Übergangsbereich von der Hebungszone entlang der Elbe-Störungszone bis zu den flachen Salzstrukturen des zentralen Norddeutschen Beckens.

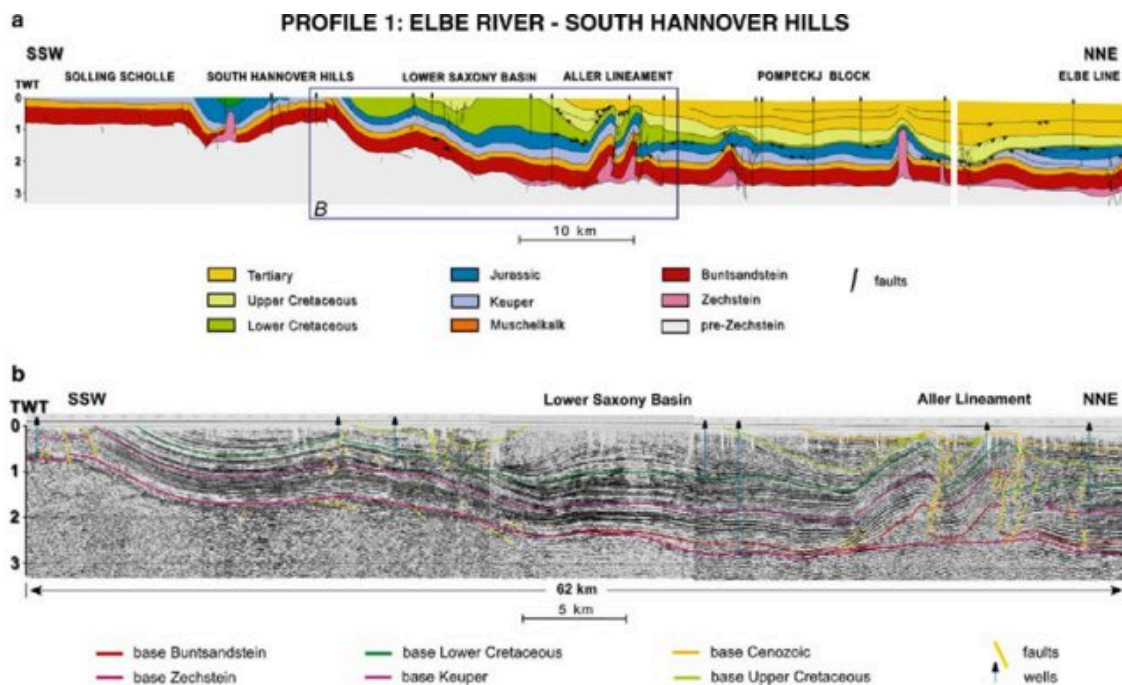


Abbildung 35: Geologischer Profilschnitt der südwestlichen Region des Norddeutschen Beckens, basierend auf seismischen Daten (Mazur et al. 2005)

Eine Auflistung der Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 63 zu finden.

Tabelle 63: Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, Bremen und Hamburg, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_so_NI_01	14
MG_s_so_NI_02	3
MG_s_so_NI_03	5
MG_s_so_NI_04	9
MG_s_so_NI_05	3540
MG_s_so_NI_06	3
MG_s_so_NI_07	79
MG_s_so_NI_08	105
MG_s_so_NI_09	360
MG_s_so_NI_10	75

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_so_NI_11	19
MG_s_so_NI_12	29
MG_s_so_NI_13	55
MG_s_so_NI_14	21
MG_s_so_NI_15	6
MG_s_so_NI_16	307
MG_s_so_NI_17	16
MG_s_so_NI_18	16
MG_s_so_NI_19	4
MG_s_so_NI_20	4
MG_s_so_NI_21	4
MG_s_so_NI_22	5
MG_s_so_NI_23	3

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 64 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 64: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum	Beschreibung
118448 70_01	6815	Röt_Salinar	Verbreitungsgrenze	Verbreitungskarte des Röt-Salinars wurde als Bewertungsgrundlage zur unmittelbaren Grenzziehung verwendet
118422 95	7775	BGE-GTA3D		Verwendetes 3D-Modell
118815 14	9105	BDNGeodin-Export Niedersachsen tiefer 300m 1. Teil, 2. Teil	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgelistet	Bohrdatenbank

DokID	Grup- pen-ID	Name des Da- tensatzes	Entscheidungserhebli- ches Datum	Beschreibung
118448 70_01	6819	Salzstrukt- ren_Inspee__ v1_poly	Salzstrukturen	Umriss der Salzstrukturen zur Grenzziehung verwendet

Zusätzlich wird folgende Karte als entscheidungserheblich eingestuft:

Boy et al. (2005): „Unterschiede der Paläogeographie von Zechstein (Perm) und Buntsandstein (Trias)“, Abbildung 62 auf Seite 127.

Aus dieser Karte wird die Verbreitungsgrenze der Röt-Salinare zur unmittelbaren Grenzziehung in einigen Bereichen verwendet.

1.2.11 Oberer Buntsandstein – Schleswig-Holstein

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein (Röt), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkte sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Schleswig-Holstein. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Buntsandstein die Salzformationen der Röt-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend wurden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung war die Ausweisung von Gebieten in Schleswig-Holstein, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei **einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Oberer Buntsandstein, *Röt-Formation*

Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Der Obere Buntsandstein ist die obere Einheit des Buntsandstein. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Niedersachsen, Bremen und Hamburg die Röt-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Oberen Buntsandstein und deren lithologische Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle Schleswig-Holstein entnommen werden (siehe Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen der Röt-Formation sind in ganz Schleswig-Holstein verbreitet (vgl. Reinhold et al. 2014; Abb. 15, S. 40).

Geologische Beschreibung

Die Röt-Formation ist eine stratigraphische Einheit im Oberen Buntsandstein der unteren Trias und bildet den Top des Buntsandstein und grenzt somit an den Muschelkalk. Die

Röt-Formation stellt die letzte stratigraphische Folge (s7) der insgesamt 7 Folgen des Buntsandstein dar (Perm-Trias Subkommission der deutschen stratigraphischen Kommission 2016). Die Röt-Formation lässt sich wiederum in 4 Unterfolgen bzw. Subformationen Röt 1-4 darstellen (Hinze 1967). Das Röt-Salinar im Nordwestdeutschen Becken ist in Unteres Röt-Salinar (Röt 1-Subformation) und Oberes Röt-Salinar zu unterteilen (Röt 2-Subformation), die jeweils eine zyklische Abfolge aus Basis-Anhydrit, Salinar und Deckanhydrit aufweisen (Röhling 1991). In der Fazieszone der zentralen Beckenbereiche sind z. T. mächtige Evaporitabfolgen abgelagert, demzufolge ist vor allem der Ablagerungsraum des Norddeutschen Beckens evaporitisch geprägt und es sind mächtige Anhydrit- und Steinsalzabfolgen, z. T. Karbonate zu verzeichnen (Beutler 2004; Röhling et al. 2018).

Das Untere Röt-Salinar setzt sich wie folgt zusammen: Röt 1-Basis-Anhydrit, Röt 1-Salinar (Vitzenburg-Steinsalz: abschnittsweise eingeschaltetes toniges oder anhydritisches Material), Röt 1-Deckanhydrit; Röt-Zwischenmittel: z. T. karbonatische Ton-, Schluff- und Feinsandsteine vorherrschend (Röhling et al. 2018).

Das Obere Röt-Salinar setzt sich wie folgt zusammen: Röt 2-Basis-Anhydrit, Röt 2-Steinsalz, Röt 2-Deckanhydrit; Rotbraune Serie: homogene, z. T. schluffige Tonsteine sowie Schluffsteine, Einschaltungen von geringmächtigen Feinsandsteinen und Anhydriten, im Norden stärker sandig; Röt-Quarzit; Grauviolette Serie (Röhling et al. 2018). Die Röt-Formation kann insgesamt maximale Steinsalzmächtigkeiten von 150 m bis 170 m aufweisen (Reinhold et al. 2014). Die Mächtigkeit vom Vitzenburg-Steinsalz beträgt 25 bis 105 m (Radzinski 2008b).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 65). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 65: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	SH	LLUR	11839735/6220	pl/ts	3D_Basismodell_SH	3D Basismodell SH (Hese et al. 2012)
2	DE	BGR	11844870_01/6815	mpk	Röt_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
3	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG25)	Verwaltungsgrenzen
4	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
5	DE	BGR	11844870_01/6819	shp	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Umriss der Salzstrukturen (von Goerne et al. 2016)
6	SH	LLUR	11873390/7714	mdb	Archiv_LLURgr300	Bohrdatenbank
7	SH	LLUR	11873390/7713	mdb	KW_Daten	Bohrdatenbank
8	SH	LLUR	11874951/7723	ts	Störtief: StM_	3D-Modell (Thomsen et al. 2017)

Bohrungsinformationen

Der staatliche geologische Dienst von Schleswig-Holstein (LLUR) hat digitale Schichtenverzeichnisse zur Verfügung gestellt. Diese sind nur für einen Teil aller bekannten Bohrungen vorhanden. Die Bohrungsdaten umfassen Schichtinformationen mit Angaben zu Stratigraphie und/oder Petrographie.

Verbreitungskarte

Im BASAL-Bericht (Reinhold et al. 2014) ist die Karte „Schematische On-shore-Verbreitung der Halit-führenden Röt-Salinare in Deutschland“ (Abb. 15 auf Seite 40) enthalten. Diese erstreckt sich über ganz Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen, Berlin sowie weite Gebiete von Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen, zudem ein Teil von Nordrhein-Westfalen. Für das Röt-Steinsalz sind nur qualitativ die Ablagerungsbereiche ohne Mächtigkeitsinformationen angegeben.

Eigenrecherche

Es wurden keine zusätzlichen thematischen Karten oder andere geologische Informationen zur Bearbeitung der Mindestanforderungen verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Röt-Salinars in Schleswig-Holstein geprüft wurde, ist in Tabelle 66 aufgelistet. Zudem wurden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 66: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Röt/Muschelkalk aus der Basisfläche Oberer Buntsandstein	b_Roet_Muschelkalk_SH.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Roet_Muschelkalk_SH_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Roet_Muschelkalk_SH_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_Roet_m_SH.dxf MG_s_Roet_m_SH.txt
3. Integration von 2D geologischen Informationen (Wirtsgesteinsvorkommen und Mächtigkeit)	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) ArcGIS Projekt	WG_Salz_stratiform_so_SH
b) Thematische Karte einladen (Reinhold et al. 2014)	Palaeogeogr_soSR
c) Salzvorkommen mit der Modellfläche verschneiden	soSR_Dissolved_Layer_Intersect
d) Salzstöcke (InSpEE) eliminieren (von Goerne et al. 2016)	soSR_Dissolved_Layer_Intersect_erase_Salzstoecke
e) Flächen kleiner als 3 km ² entfernen	soSR_Dissolved_Layer_Intersect_erase_Salzstoecke_cut_3squarekm
f) Bohrdaten einladen	Alle_Bohrungen_SH
g) Bohrungen filtern nach Stratigraphie und Petrographie	Alle_Bohrungen_so_Na
h) Prüfung auf Suchteufe (300 m bis 1500 m)	Alle_Bohrungen_so_Na_innerhalb_MA
i) Prüfung auf Mindestanforderung (Mächtigkeit größer gleich 100 m)	Alle_Bohrungen_so_Na_innerhalb_MA_geringmaechtig

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 66 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Hier wurde das Basismodell SH (Hese et al. 2012) verwendet, da der Bearbeitungsraum des Modells größer ist als im ebenso vorliegenden StörTief-Modell. Da Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, auch außerhalb des Modellumfangs des StörTief-Modells zu erwarten waren, wurde von der Verwendung ebendieses abgesehen.

Das Basismodell SH ist ein erstes geologisches 3D-Modell des Geologischen Dienstes Schleswig-Holstein (des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume LLUR) aus dem Jahr 2012. Zur Bearbeitung des Modells wurden Daten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland (Baldschuhn et al. 2001) verwendet. Störungsflächen wurden nicht als durchgehende Flächen ausgehalten, sondern lediglich als vertikale Versätze dargestellt. Das modellierte Gebiet umfasst das komplette Bundesland Schleswig-Holstein inklusive der 12-Seemeilen-Zone. Folgende Flächen wurden hauptsächlich als Basisflächen modelliert:

- GTA3D_00_Topographie: Geländeoberfläche
- GTA3D_01_Basis_TmiR: Mittleres Miozän
- GTA3D_02_Basis_TmiU: Miozän
- GTA3D_03_Basis_ToIM: Mittleres Oligozän

- GTA3D_04_Basis_TeoM: Mittleres Eozän
- GTA3D_05_Basis_TpaO: Oberes Paläozän
- GTA3D_06_Basis_KrO: Obere Kreide
- GTA3D_07_Basis_KrU: Untere Kreide
- GTA3D_08_Basis_JO: Oberer Jura
- GTA3D_09_Basis_JM: Mittlerer Jura
- GTA3D_10_Basis_JU: Unterer Jura
- GTA3D_11_Basis_K: Keuper
- GTA3D_12_Basis_SO: Oberer Buntsandstein
- GTA3D_13_Basis_SU: Unterer Buntsandstein
- GTA3D_14_Basis_Z: Zechstein
- GTA3D_Salzdiapire: Hüllflächen der Salzstrukturen

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 66 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Bearbeitungsfläche Roet_Muschelkalk wurde aus der Basisfläche Oberer Buntsandstein erzeugt (Tabelle 66, Nr. 2b). Diese Fläche stellt die nächstgelegene stratigraphische Basisfläche des Röts dar.

Das digitale Geländemodell für Schleswig-Holstein wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 66, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben(Tabelle 66, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 66, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Roet_Muschelkalk und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Keuper (nächste nachfolgende Basisfläche) sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 66, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 66, Nr. 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 66, Nr. 2h). Des Wei-

teren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profilsschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagererelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Roet_Muschelkalk wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 66, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Die Salzformationen des Oberen Buntsandstein umfassen nur einen Teil der verfügbaren modellierten, stratigraphischen Einheit im 3D-Modell des Landes Schleswig-Holstein. Durch die Verwendung thematischer Karten und Bohrungsinformationen können Gebiete über die Auswertung des 3D-Modells hinaus spezifischer ausgewiesen werden, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

Die Auswertung der in Tabelle 65 aufgeführten Daten erfolgte gemäß der im Folgenden aufgeführten Schritte.

Bohrdaten

Alle Salzhorizonte von Rotliegend bis Keuper in den Bohrdaten wurden vorgefiltert und als Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt: SH_KW__Salz__GID__Auswahl-per-VBA-code_neu20200420_test2.

In der Excel-Tabelle der Bohrungsdaten wird der vorgefilterte „Salz FILTER“-Datensatz ausgewählt. Die Filterauswahl erfolgt dann nach der entsprechenden Stratigraphie (Oberer Buntsandstein) und nach Petrographie gemäß Begriffsdefinition (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j). Wichtig hierbei war, dass die Hauptkomponente entweder Steinsalz (^na) ist, oder andere Gesteinsarten, die überwiegend Steinsalz enthalten (siehe Begriffsbestimmung). Alle relevanten Steinsalzhorizonte wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Wenn in einer Bohrung mehrere Salzhorizonte vorkamen, dann wurden die Mächtigkeiten kumuliert.

Auswertung der thematischen Karten

Die bereits georeferenzierte thematische Karte wurde in ein GIS-Projekt (WG_Salz_stratiform_so_SH) eingeladen (Shape: Palaeogeogr_soSR) (Tabelle 66, Nr. 3a, b).

Als Nächstes wurde die Basis-Fläche (DXF-Fläche) als Polygon-Featureclass eingeladen und in ein 2D-Polygon-Shape konvertiert (Tool: Dissolve (Dissolve-Feld: Layer, Shape: Dissolved_Layer). Dann wurde das 2D-Polygon-Shape mit der thematischen Karte verschnitten (Tool: Intersect; Shape: soSR_Dissolved_Layer_Intersect) (Tabelle 76, Nr. 3c). Sodann wurden die Salzstöcke (Shape: Salzstrukturen_Inspee_v1_poly) innerhalb der Modellfläche entfernt (Tool: Erase, Shape: soSR_Dissolved_Layer_Intersect_erase_Salzstoecke) (Tabelle 66, Nr. 3d).

Nachdem die Bewertung der Salzmächtigkeit bereits erfolgt war (siehe nachfolgende Auswertung), wurden alle Flächen eliminiert, die kleiner waren als 3 km², außer diejenigen, die an Nachbarländer grenzten (Tools: Explode Multipart Feature, Calculate Geometry in Spalte shape_area, Definition Query: Shape_Area >= 3000000; Shape: soSR_Dissolved_Layer_Intersect_erase_Salzstoেকে_cut_3squarekm) (Tabelle 76, Nr. 3e).

Bewertung der Salzmächtigkeit

Die Tabelle mit den Bohrungsdaten von Schleswig-Holstein wurde als Shape-Datei in das GIS-Projekt eingeladen (Tabelle 66, Nr. 3f). Sodann wurden alle Daten hinzugefügt, die in Tabelle 65 aufgelistet sind. Vorab werden alle Bohrungen, die sich innerhalb der Salzstöcke (Layer: *Salzstrukturen_Inspee_v1_poly*) befanden, gelöscht. Um die Schichten, die man bei der Bohrungsaufbereitung geprüft hat, weiter zu selektieren, wurden diese nach Stratigraphie (Oberer Buntsandstein) und Petrographie (^na) gefiltert (Select by attributes; Shape: *Alle_Bohrungen_so*). Für eine bessere Übersicht wurde in den Attribut-Tabellen der Bohrungen selektiert und gefiltert (Tabelle 66, Nr. 3g). Die Schichten ohne Angaben zu einem der Kriterien wurden zunächst in die nächste Filterauswahl mitgeführt.

Nachdem man die Mächtigkeiten der Salzsichten ermittelt hat, wurden die Salzhorizonte eliminiert, die sich außerhalb der Suchteufe (kleiner als 300 m; größer als 1500 m) befanden und die restlichen wurden beibehalten (Shape: *..._innerhalb_MA*) (Tabelle 66, Nr. 3h). Die Daten, die sich innerhalb des Mindestanforderungsfensters befinden, wurden in zwei Shapes unterteilt, die jeweils einmal die Salzsichten repräsentierten, die einmal geringmächtiger waren als 100 m (Shape: *..._geringmaechtig*) und einmal mächtiger waren als 100 m (Shape: *..._gleich_o_maechtiger_100m*) (Tabelle 66, Nr. 3i).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10⁻²¹ m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10⁻¹² m/s und weniger.

Die lithostratigraphische Einheit *Röt-Formation* besteht gemäß der Inventarisierungstabelle für Schleswig-Holstein (Kapitel 5) aus mächtigen Anhydrit- und Steinsalzabfolgen in zentralen Beckenbereichen. Die Steinsalzabfolgen können maximale Mächtigkeiten von 150 m bis 170 m aufweisen. Da in allen ausgewiesenen Gebieten die Röt-Formation verbreitet ist und mächtige Steinsalze zu vermuten sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **erfüllt** eingeschätzt.

**Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG**

Die Mächtigkeit des Röt wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die stratigraphischen Einheiten des Oberen Buntsandstein sowie des gesamten Muschelkalk zusammen.

Darüber hinaus wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbank aus Schleswig-Holstein hinsichtlich der Steinsalz-Mächtigkeiten überprüft. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass in der Bohrung 2329/04/1001/E (auch genannt: 2329/04/1002/E) ein Salzhorizont mit 117 m Mächtigkeit in 1472,5 m Basistiefe ange-
troffen wurde. Diese Bohrung befindet sich innerhalb der Modellfläche. Als weiterer Be-
leg kann auf die Literatur verwiesen werden, die 150 m – 170 m mächtige Steinsalzho-
rizonte erwähnt (Röhling et al. 2018).

Daher wird in allen ausgewiesenen Gebieten die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

**Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG**

Die Tiefenlage der Unterkante des Röt wurde anhand des 3D-Modells unter Einbezie-
hung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK
erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde
eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Diese Aussage wird u. a. gestützt durch folgende Bohrung:

- 2329/04/1001/E o. 2329/04/1002/E (Abkürzung: MO-T 1 oder 1 (2.)): 117 m
Mächtigkeit in 1481 m Basistiefe

Demzufolge wird in allen ausgewiesenen Gebieten die Mindestanforderung „minimale
Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenom-
men (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen
erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die
diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenom-
men Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Auswei-
sung der identifizierten Gebiete geprüft.

Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung
zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen

anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Somit sind in allen resultierenden Gebieten zum jetzigen Zeitpunkt alle Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllt.

Ergebnis

In Abbildung 36 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Oberer Buntsandstein in Schleswig-Holstein dargestellt.

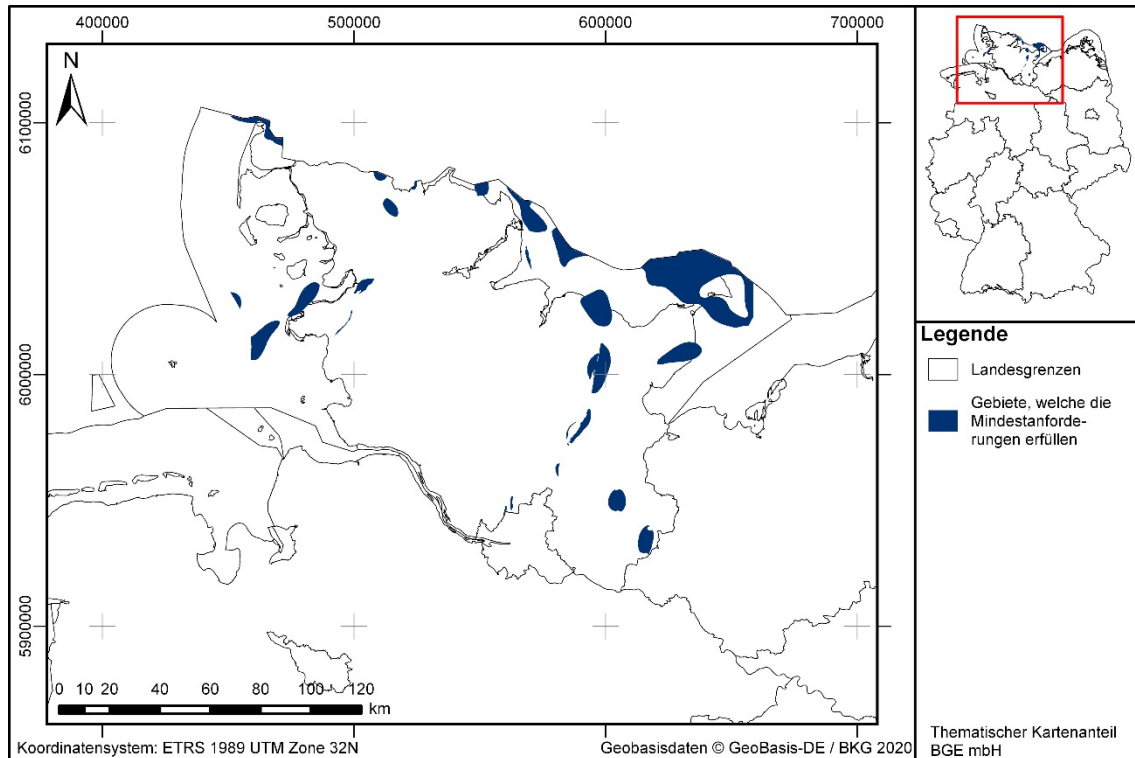


Abbildung 36: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Oberen Buntsandstein in Schleswig-Holstein

Das Querprofil in Abbildung 37 veranschaulicht einen Ausschnitt des Norddeutschen Beckens. Der Unterbau wird von Süden nach Norden von Variszischem, Kaledonischem und Baltischem Grundgebirge gebildet. Seit dem Karbon ist ein nahezu einheitlicher Sedimentationsraum vorzufinden. Die Struktur des postkarbonen Untergrunds ist durch Halokinese der Rotliegend- und Zechsteinsalinare deutlich beeinflusst.

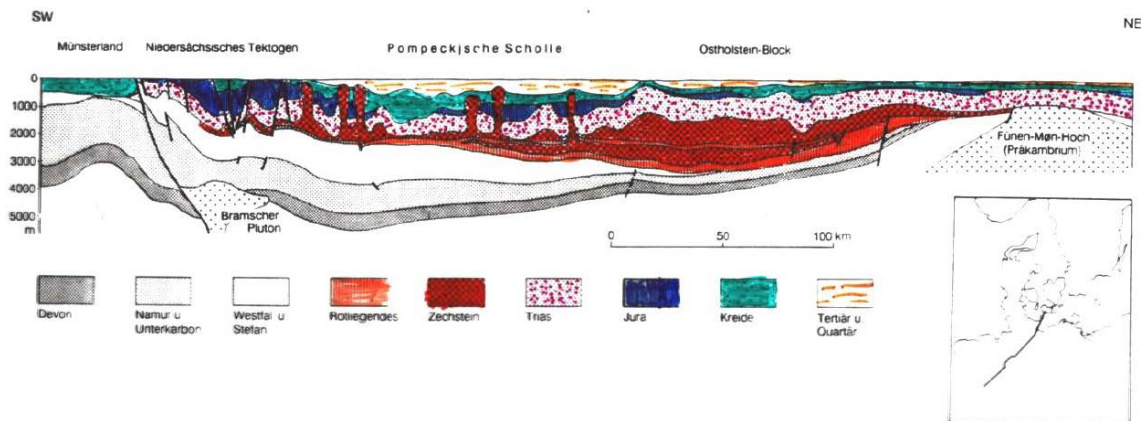


Abbildung 37: Ausschnitt aus dem SW-NE-Profileschnitt durch Schleswig-Holstein (Walter 2007)

Eine Auflistung der Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 67 zu finden.

Tabelle 67: Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_so_SH_01	2
MG_s_so_SH_02	5
MG_s_so_SH_03	5
MG_s_so_SH_04	4
MG_s_so_SH_05	30
MG_s_so_SH_06	95
MG_s_so_SH_07	12
MG_s_so_SH_08	127
MG_s_so_SH_09	71
MG_s_so_SH_10	24
MG_s_so_SH_11	8
MG_s_so_SH_12	28
MG_s_so_SH_13	91
MG_s_so_SH_14	24
MG_s_so_SH_15	4
MG_s_so_SH_16	12
MG_s_so_SH_17	49

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_so_SH_18	5
MG_s_so_SH_19	52
MG_s_so_SH_20	50
MG_s_so_SH_21	108
MG_s_so_SH_22	85
MG_s_so_SH_23	639
MG_s_so_SH_24	76

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 68 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 68: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11839735	6220	3D_Basismodell_SH		Verwendetes 3D-Modell
11873390	7714	Archiv_LLURgr300	Schichtenverzeichnisse aller entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgeführt	Bohrdatenbank
11873390	7713	KW_Daten	Schichtenverzeichnisse aller entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgeführt	Bohrdatenbank
11844870_01	6819	Salzstrukturen_Inspeev1_poly	Salzkissen	Zur Identifizierung von Salzkissenstrukturen verwendet
11844870_01	6815	Röt-Salinar	Verbreitungsgrenze	Die Verbreitungsgrenze des des Röt-Salinars wurde als Bewertungsgrundlage zur Grenzziehung verwendet

1.2.12 Mittlerer Muschelkalk – Baden-Württemberg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkte sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Baden-Württemberg. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Muschelkalk die Salzformationen der Heilbronn-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend wurden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung war die Ausweisung von Gebieten in Baden-Württemberg (BW), welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese wurden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgte eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Mittlerer Muschelkalk, *Heilbronn Formation*

Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Der Mittlere Muschelkalk ist die mittlere Einheit des Muschelkalk. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Baden-Württemberg die Heilbronn-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Muschelkalk und deren lithologische Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Baden-Württemberg entnommen werden (siehe Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Das Muschelkalk-Salinar hat eine Nordost-Südwest streichende Verbreitung von der Grenze Bayerns über Stuttgart bis nach Bad Dürkheim, eine großflächige Verbreitung bei Heilbronn, zudem vermutete Verbreitungen westlich von Heilbronn und im Süden von Baden-Württemberg an der Grenze zur Schweiz (vgl. Reinhold et al. 2014; Abb. 18, S. 47).

Geologische Beschreibung

Der Mittlere Muschelkalk ist die mittlere Einheit des Muschelkalk, der die mittlere Einheit der Trias bildet. Die Stratigraphie des Muschelkalk hat sich im Muschelkalkmeer im Germanischen Becken gebildet. Im Mittleren Muschelkalk kam es zu Regressionen (Meeresspiegelrückgänge) und Eindampfungsprozessen, die zur Ablagerung von Evaporiten (Eindampfungsgesteinen) führten. Bei jeder sedimentären Ablagerung herrschen unterschiedliche Ablagerungsbedingungen, insbesondere Meeresspiegelschwankungen. Sobald der Prozess einer charakteristischen sedimentären Ablagerung vollendet ist, hat ein Zyklus stattgefunden. Die Heilbronn-Formation umfasst die Zyklen 2 bis 8 von insgesamt 9 Sedimentationszyklen des Mittleren Muschelkalk (Brückner-Röhling 1999). Die Karlstadt-Formation bildet den ersten Zyklus. Der Mittlere Muschelkalk besteht in zeitlicher Sedimentationsabfolge aus Dolomit, Gips, Anhydrit und Steinsalz, wobei die Karlstadt-Formation aus Dolomit und die Heilbronn-Formation aus Sulfaten/Chloriden bestehen. Steinsalzführende Schichten sind demzufolge in der Heilbronn-Formation zu erwarten (Beutler 2004). Diese sind u. a. auch in Baden-Württemberg zu verzeichnen (Simon 1988).

Die Heilbronn-Formation in Baden-Württemberg besteht aus Abfolgen von Anhydrit, Anhydrit mit dolomitischen Zwischenlagen, Anhydrit-Tonmergelstein-Wechselfolgen sowie Steinsalzschiefern (Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau 2016). Bei Heilbronn sind Steinsalzmächtigkeiten bis ca. 100 m zu verzeichnen (Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau 2016).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 69). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 69: *Auflistung aller verwendeten Daten*

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	BW	LGRB	11867394/7264	ts	Landesmodell	3D-Modell von Baden-Württemberg (Rupf & Nitsch 2008)
2	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
3	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
4	DE	BGR	11844870_01/6812	mpk	Muschelkalk_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
5	BW	UMB WL	11873083_01/7767	csv	adb_schichtdaten_grgl_300	Schichtenverzeichnis
6	BW	UMB WL	11873083_01/7767	csv	adb_stammdaten_grgl_300	Bohrungs-Stammdaten

Bohrungsinformationen

Das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau von Baden-Württemberg (LGRB) hat digitale Schichtenverzeichnisse zur Verfügung gestellt. Diese sind nur für einen Teil aller bekannten Bohrungen vorhanden. Die Bohrungsdaten umfassen Schichtinformationen mit Angaben zu Stratigraphie und/oder Petrographie.

Verbreitungskarte

Im BASAL-Bericht (Reinhold et al. 2014) ist die Karte „Schematische On-shore-Verbreitung der Halit-führenden Muschelkalk-Salinare in Deutschland“ (Abb. 18 auf Seite 47) enthalten. Diese erstreckt sich über ganz Hamburg und Bremen sowie weite Teile von Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Schleswig-Holstein sowie kleinere Gebiete von Sachsen-Anhalt, Thüringen, Nordrhein-Westfalen, Bayern und Baden-Württemberg. Für das Muschelkalk-Steinsalz sind nur qualitativ die Ablagerungsgebiete ohne Mächtigkeitsinformationen angegeben.

Eigenrecherche

Es wurden keine zusätzlichen thematischen Karten oder andere geologische Informationen zur Bearbeitung der Mindestanforderungen verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Mittleren Muschelkalk in Baden-Württemberg geprüft wurde, ist in Tabelle 70 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 70: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Dogger aus der Basisfläche Dogger (aus allen Kacheln)	b_Muschelkalk_BW.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Muschelkalk_BW_MACRORESULT.ts
g) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	b_Muschelkalk_BW_MACRORESULT_AK.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Muschelkalk_BW_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_m_BW.dxf MG_s_m_BW.txt
3. Integration von 2D geologischen Informationen	
a) ArcGIS Projekt	WG_Salz_stratiform_mm_BW
b) Salzvorkommen auf Baden-Württemberg begrenzen	mmSF_erwiesen_BW mmSF_vermutet_BW

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Salzvorkommen mit der Modellfläche verschneiden	mmSF_erwiesen_Dissolved_Layer_Intersect_BW mmSF_vermutet_Dissolved_Layer_Intersect_BW
d) Flächen kleiner als 3 km ² entfernen	mmSF_erwiesen_Dissolved_Layer_Intersect_BW_cut_3squarekm
e) Bohrdaten einladen	Alle_Bohrungen_BW
f) Bohrungen filtern nach Stratigraphie und Petrographie	Alle_Bohrungen_mm_Na
g) Prüfung auf Tiefenlage (300 m bis 1500 m)	Alle_Bohrungen_mm_Na_innerhalb_MA
h) Prüfung auf Mindestanforderung (Mächtigkeit größer gleich 100 m)	Alle_Bohrungen_mm_Na_innerhalb_MA_geringmaechtig Alle_Bohrungen_mm_Na_erwiesen_innerhalb_MA_geringmaechtig

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 70 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell von Baden-Württemberg entstand im Kontext der geowissenschaftlichen Übersichtskartierung, es basiert auf einer lithostratigraphischen Gliederung (Rupf & Nitsch 2008). Im Rahmen der geologischen 3D-Modellierung wurden ältere, teils publizierte Eingangsdaten (Bohrungen etc.) überarbeitet und neu interpretiert. Unterschiede in der Verbreitung, Mächtigkeit und Raumlage einzelner Elemente zu anderen geologischen 3D-Modellen können daher aufgrund verschiedener Bearbeitungszeiträume und Modellierungsmethoden auftreten.

Das Landesmodell weist eine Top- und neun Basisflächen auf:

- Tertiär
- Oberjura
- Mitteljura
- Unterjura
- Keuper
- Muschelkalk
- Buntsandstein

- Zechstein
- Permokarbon,
- Grundgebirge (Topfläche)

Die Detailmodelle GeORG bildet ausschließlich den Oberrheingraben ab sowie GeoMol das Molassebecken, weshalb diese Modelle für die Bearbeitung des Muschelkalk nicht berücksichtigt wurden.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 70 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Muschelkalk wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche Muschelkalk verwendet.

Das digitale Geländemodell für Baden-Württemberg wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 70, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 70, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 70, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Muschelkalk und der Topfläche berechnet (Tabelle 70, Nr. 2f). Die Topfläche setzt sich aus der Basisfläche Keuper sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 70, Nr. 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen, für die ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert wurde (vgl. BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde (Tabelle 70, Nr. 2g). Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ in m u. GOK überprüft

sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert (Tabelle 70, Nr. 2h).

Die Bearbeitungsfläche Muschelkalk wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 70, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Die Salzformationen des Mittleren Muschelkalk umfassen nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell des Landes Baden-Württemberg. Durch die Verwendung thematischer Karten und Bohrungsinformationen können Gebiete über die Auswertung des 3D-Modells hinaus spezifischer ausgewiesen werden, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Die Auswertung der aufgeführten Daten erfolgte gemäß der im Folgenden aufgeführten Schritte.

Bohrdaten

Alle Salzhorizonte von Muschelkalk in den Bohrdaten wurden vorgefiltert und als Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt: `BW_Salz__Auswahl-per-VBA-code_neu20200420_test2`.

In der Excel-Tabelle der Bohrungsdaten wurde der vorgefilterte „Salz FILTER“-Datensatz ausgewählt. Die Filterauswahl erfolgte dann nach der entsprechenden Stratigraphie (Mittlerer Muschelkalk) und nach Petrographie gemäß Begriffsdefinition (vgl. BGE 2020j). Wichtig hierbei war, dass die Hauptkomponente entweder Steinsalz ($^{\wedge}$ na) ist, oder andere Gesteinsarten, die überwiegend Steinsalz enthalten (siehe Begriffsbestimmung). Alle relevanten Steinsalzhorizonte wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Wenn in einer Bohrung mehrere Salzhorizonte vorkamen, wurden die Mächtigkeiten kumuliert.

Auswertung der thematischen Karten

Die bereits georeferenzierte thematische BASAL-Karte (Tabelle 69) wurde in ein GIS-Projekt (`WG_Salz_stratiform_mm_BW`) eingeladen und mit der Bundesland-Fläche von Baden-Württemberg verschnitten (Tool: Intersect; Shape: `mmSF_BW`). Da die Verbreitungskarte des Muschelkalk-Salinars sowohl erwiesene als auch vermutete Gebiete darstellt, wurde dieser Vorgang für jeweils beide Fälle angewendet (Tabelle 70, Nr. 3b).

Als Nächstes wurde die exportierte Basis-Fläche (DXF-Fläche) als Polygon-Featureclass eingeladen und in ein 2D-Polygon-Shape konvertiert (Tool: Dissolve (Dissolve-Feld: Layer, Shape: `Dissolved_Layer_BW`). Dann wurde das 2D-Polygon-Shape mit den Verbreitungskarten verschnitten (Tool: Intersect; Shape: `mmSF_erwiesen_Dissolved_Layer_Intersect_BW` und `mmSF_vermutet_Dissolved_Layer_Intersect_BW`) (Tabelle 70, Nr. 3c). Die vermuteten Gebiete wurden fortan nicht berücksichtigt, es sei denn, es resultierten Mindestanforderungsgebiete oder entscheidungserhebliche Bohrungen in diesen Gebieten.

Nachdem die Bewertung der Salzmächtigkeit bereits erfolgt war (siehe nachfolgende Auswertung), wurden alle Flächen kleiner als 3 km² eliminiert (Tools: Explode Multipart Feature, Calculate Geometry in Spalte shape_area, Definition Query: Shape_Area >= 3000000; Shape: mmSF_Dissolved_Layer_Intersect_BW_cut_3squarekm) (Tabelle 70, Nr. 3d).

Bewertung der Salzmächtigkeit

Die Tabelle mit den Bohrungsdaten von Baden-Württemberg wurde als Shape-Datei eingeladen (Tabelle 70, Nr. 3e). Im GIS-Projekt wurden sodann alle Daten eingeladen, die in Tabelle 69 aufgelistet sind. Um die Schichten, die man bei der Bohrungsaufbereitung geprüft hat, weiter zu selektieren, wurden diese nach Stratigraphie (Mittlerer Muschelkalk) und Petrographie (^na) gefiltert (Select by attributes; Shape: Alle_Bohrungen_mm_Na). Für eine bessere Übersicht geschah dies in den Attribut-Tabellen der Bohrungen. Hierbei wurden alle Stratigraphien (mEozän-uOligozän) aussortiert, in denen Muschelkalk-Salinar nicht zu erwarten war (Tabelle 70, Nr. 3f). Die Schichten ohne Angaben zu einem der Kriterien wurden zunächst in die nächste Filterauswahl mitgeführt (z. B. auch Evaporit als Mineralname).

Nachdem man die Mächtigkeiten der Salzsichten ermittelt hat, wurden die Salzhorizonte eliminiert, die sich außerhalb der Mindestanforderungstiefen (kleiner als 300 m; größer als 1500 m) befanden und die restlichen wurden beibehalten (Shape: ..._innerhalb_MA) (Tabelle 70, Nr. 3g). Die Daten, die sich innerhalb des Mindestanforderungsfensters befanden, wurden in zwei Shapes unterteilt, die jeweils einmal die Salzsichten repräsentierten, die einmal geringmächtiger waren als 100 m (Shape: ..._geringmaechtig) und einmal geringmächtiger waren als 100 m sowie Steinsalz als Petrographie und Mittlerer Muschelkalk als Stratigraphie erwiesen waren (Shape: Alle_Bohrungen_mm_Na_erwiesen_innenhalb_MA_geringmaechtig) (Tabelle 70, Nr. 3h).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10⁻²¹ m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz (BGE 2020b), der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an. Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10⁻¹² m/s und weniger.

Die lithostratigraphische Einheit *Mittlerer Muschelkalk* besteht gemäß der Inventarisierungstabelle in der Heibronn-Formation in Baden-Württemberg aus Anhydritstein und Steinsalz-führenden Schichtenfolgen (BGE 2020l). Die Steinsalzmächtigkeit erreicht maximal ca. 100 m. Da in allen ausgewiesenen Gebieten Mittlerer Muschelkalk verbreitet

ist und Steinsalze mit 100 m Mächtigkeit zu vermuten sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **potentiell erfüllt** eingeschätzt. Diese Einschätzung wird durch Schichtenverzeichnisse der Bohrungen in Baden-Württemberg jedoch nicht unterstützt (vgl. Anhang 1).

*Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG*

Die Mächtigkeit des Schichtpakets Röt bis Muschelkalk wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der stratigraphischen Einheiten des Röt und des gesamten Muschelkalk zusammen.

Es wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbank aus Baden-Württemberg hinsichtlich der Steinsalz-Mächtigkeiten überprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass in keiner Bohrung mit vorliegendem Schichtenverzeichnis die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ mit Steinsalz-Mächtigkeiten gleich oder mehr als 100 m erfüllt wurde (siehe Tabelle XX im Anhang). Es gibt daher keinen belastbaren Beleg, dass das Muschelkalk-Salinar in Baden-Württemberg ausreichend hohe Mächtigkeiten aufweisen kann. Die maximale nachgewiesene Steinsalz-Mächtigkeit liegt bei 19,4 m in Bohrung Dangstetten 1.

Daher wird die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für den Mittleren Muschelkalk in Baden-Württemberg als **wahrscheinlich nicht erfüllt** betrachtet.

*Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG*

Die Tiefenlage des Schichtpakets Röt bis Muschelkalk wurde im südlichen Teil anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Diese Vermutung wird durch Bohrungsdaten, die Steinsalze in der entsprechenden Tiefenlage aufweisen, bekräftigt. Dazu gehören folgende Bohrungen:

- Forschungsbohrung „Ransbach“, Stromberg (355 m Basistiefe)
- Rheinheim 1 (333 m Basistiefe)
- Rheinheim VII (325 m Basistiefe)
- Unterschmeien 1 (902 m Basistiefe)
- Solebohrung XI/2003 Bad Dürkheim (301 m Basistiefe)
- Dangstetten 1 (398 m Basistiefe)

Davon ist die Bohrung Dangstetten 1 die einzige Bohrung, die sich innerhalb der Modellfläche befindet.

Demzufolge wird in allen ausgewiesenen Gebieten die Mindestanforderung „minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** eingestuft.

Zusammenfassende Bewertung

In Baden-Württemberg wurden nur in sechs der vorliegenden Bohrungen mit digitalen Schichtenverzeichnissen Steinsalze in der gesuchten Teufenlage von 300 b – 1500 m u. GOK angetroffen. Die nachgewiesenen Mächtigkeiten des Steinsalzes liegen mit 19 m ebenfalls deutlich unterhalb der geforderten Mächtigkeit von 100 m.

Im Hinblick auf das weitere Vorgehen bzgl. des Muschelkalk-Salinars ist auch die Tatsache zu beurteilen, dass in keiner Bohrung mit vorliegendem Schichtenverzeichnis die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ auch nur annähernd erfüllt ist. Daher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es ein Gebiet gibt, das über mindestens 3 km² **alle Mindestanforderungen erfüllt, als unwahrscheinlich einzustufen.**

Aufgrund dieser Ergebnisse sind für das Muschelkalk-Salinar in Baden-Württemberg nicht alle Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllt.

Damit entfällt eine weitere Bearbeitung des Mittleren Muschelkalk in Baden-Württemberg und es werden keine Gebiete identifiziert. Somit kann auf die Beurteilung der Mindestanforderungen „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4) und „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5) verzichtet werden.

Ergebnis

In Abbildung 38 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Muschelkalk in Baden-Württemberg dargestellt. Es wurden keine Gebiete, die alle Mindestanforderungen erfüllen, identifiziert.

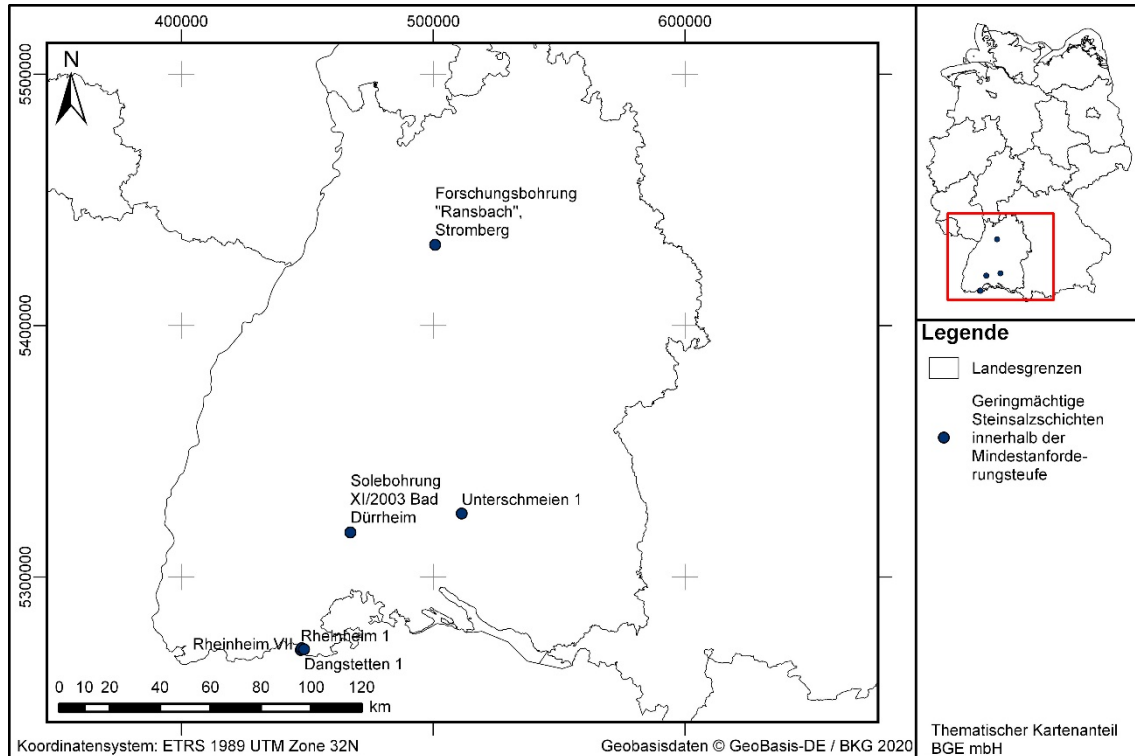


Abbildung 38: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Mittleren Muschelkalk in Baden-Württemberg

Abbildung 39 veranschaulicht mit einem Schnitt durch Südwestdeutschland von Nordwesten nach Südosten, von Oberschwaben bis zur Oberrheinischen Tiefebene, den Einfall der mesozoischen Gesteinsschichten auf paläozoischem Grundgebirge im Schichtstufenland sowie den Sedimentationsraum des Oberrheingrabens.

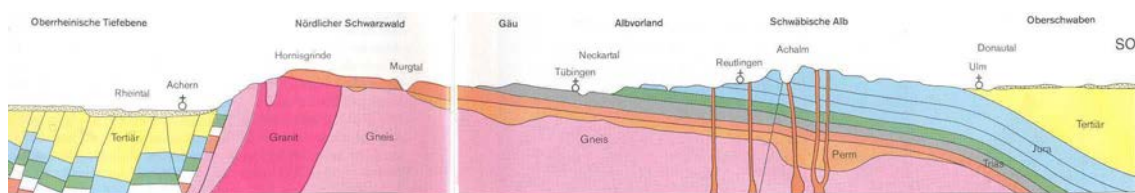


Abbildung 39: Ausschnitt aus dem NW-SO-Profileschnitt durch Baden-Württemberg (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 1999)

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 71 sind alle Daten aufgeführt, die für die Anwendung der Mindestanforderung als entscheidungserheblich eingestuft werden. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 71: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
118730 83_01	7767	adb_schichtdaten_grgl_300	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind im Anhang aufgeführt	Bohrdatenbank
118730 83_01	7767	adb_stammdaten_grgl_300	Bohrungs-Stammdaten	Bohrungs-Stammdaten
118673 94	7264	Landesmodell	Basisflächen von Keuper und Muschelkalk	Verwendetes 3D-Modell von Baden-Württemberg
118448 70_01	6812	Muschelkalk_Salinar	Verbreitungsgrenze	Verbreitungsgrenze des Muschelkalk-Salinars wurde zum Abgleich der Daten verwendet

1.2.13 Mittlerer Muschelkalk – Mecklenburg-Vorpommern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Mecklenburg-Vorpommern. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Muschelkalk die Salzformationen der Heilbronn-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Mittlerer Muschelkalk, *Heilbronn-Formation*

Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Der Mittlere Muschelkalk ist die mittlere Einheit des Muschelkalk. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Niedersachsen die Heilbronn-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Mittleren Muschelkalk und deren lithologische Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle Mecklenburg-Vorpommern entnommen werden (siehe Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen des Mittleren Muschelkalk sind nur im Westen von Mecklenburg-Vorpommern, zwischen Kühlungsborn, Neubrandenburg und Eberswalde, verbreitet.

Geologische Beschreibung

Der Mittlere Muschelkalk ist die mittlere Einheit des Muschelkalk, der die mittlere Einheit der Trias bildet. Die sedimentäre Abfolge des Muschelkalk hat sich im Muschelkalkmeer im Germanischen Becken gebildet. Im Mittleren Muschelkalk kam es zu Regressionen (Meeresspiegelrückgänge) und Eindampfungsprozessen, die zur Ablagerung von Evaporiten (Eindampfungsgesteinen) führten. Bei jeder sedimentären Ablagerung herrschen unterschiedliche Ablagerungsbedingungen, insbesondere Meeresspiegelschwankungen. Sobald der Prozess einer charakteristischen sedimentären Ablagerung vollendet ist, hat ein Zyklus stattgefunden. Die Heilbronn-Formation umfasst die Zyklen 2 bis 8 von insgesamt 9 Sedimentationszyklen des Mittleren Muschelkalk (Brückner-Röhling 1999). Die Karlstadt-Formation bildet den ersten Zyklus.

Der Mittlere Muschelkalk besteht in zeitlicher Sedimentationsabfolge aus Dolomit, Gips, Anhydrit und Steinsalz, wobei die Karlstadt-Formation aus Dolomit und die Heilbronn-Formation aus Sulfaten/Chloriden bestehen. Steinsalzführende Schichten sind demzufolge in der Heilbronn-Formation zu erwarten (Beutler 2004).

Nach Althen et al. (1980) kommt das Muschelkalk-Salinar generell in Nordostdeutschland vor. In Mecklenburg-Vorpommern sind für den gesamten Mittleren Muschelkalk Mächtigkeiten von 90 bis 140 m angegeben (Beutler 2004), konkrete Angaben zu Mächtigkeiten des Muschelkalk-Salinars liegen jedoch nicht vor.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 72). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 72: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BGR	11844870_01/ 6812	mpk	Muschelkalk_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
2	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
3	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
4	DE	BGR	11844870_01/6819	shp	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Umrisse der Salzstrukturen (von Goerne et al. 2016)
5	MV	LUNG	11886665/9022	xlsx	LUNG_Daten_Bohrungen_SVZ_BLM_Teil_1	Bohrdatenbank
6	MV	LUNG	11886665/9022	xlsx	LUNG_Daten_Bohrungen_SVZ_BLM_Teil_2	Bohrdatenbank
7	MV	LUNG	11888776/9164	mdb	LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06	Bohrdatenbank
8	MV	LUNG	11840104/115	shp	Salz_diapir_MV_Namen	Verbreitungskarte

Bohrungsinformationen

Der staatliche geologische Dienst von Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) hat digitale Schichtenverzeichnisse zur Verfügung gestellt. Diese sind nur für einen Teil aller bekannten Bohrungen vorhanden. Die Bohrungsdaten umfassen Schichtinformationen mit Angaben zu Stratigraphie und/oder Petrographie.

Verbreitungskarte

Im BASAL-Bericht (Reinhold et al. 2014) ist die Karte „Schematische On-shore-Verbreitung der Halit-führenden Muschelkalk-Salinare in Deutschland“ (Abb. 18 auf Seite 47) enthalten. Diese erstreckt sich über ganz Hamburg und Bremen sowie weite Teile von Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Schleswig-Holstein sowie kleinere Gebiete von Sachsen-Anhalt, Thüringen, Nordrhein-Westfalen, Bayern und Baden-Württemberg. Für das Muschelkalk-Steinsalz sind nur qualitativ die Ablagerungsbereiche ohne Mächtigkeitsinformationen angegeben.

Eigenrecherche

Es wurden keine zusätzlichen thematischen Karten oder andere geologische Informationen zur Bearbeitung der Mindestanforderungen verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit und Tiefenlage des Muschelkalk-Salinars in Mecklenburg-Vorpommern geprüft wurde, ist in Tabelle 73 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 73: Vorgehensweise der Bearbeitung zur Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
Integration von 2D geologischen Informationen	
a) ArcGIS Projekt	WG_Salz_stratiform_mm_so_MV
b) Thematische Karte einladen (Reinhold et al. 2014)	Palaeogeogr_mmSF
c) Verbreitungskarten der Salzstrukturen (Salzstöcke und Diapire) einladen (von Goerne et al. 2016)	Salzstrukturen_Inspee_v1_poly Salzstöcke Salz_diapir_MV_Namen
d) Bohrdaten einladen	Alle_Bohrungen_MV
e) Bohrungen in Salzstöcken entfernen	Alle_Bohrungen_MV_ausserhalb_Salzstöcke
f) Bohrungen filtern nach Stratigraphie und Petrographie	Bohrungen_mm_na
g) Prüfung auf Mindestanforderung (300 m bis 1500 m)	Bohrungen_mm_na_ausserhalb_MA Bohrungen_mm_na_innerhalb_MA
h) Prüfung auf Mindestanforderung (Mächtigkeit größer gleich 100 m)	Bohrungen_mm_na_innerhalb_MA_geringmachtig

Bearbeitung im 3D-Modell

Da für das zu bearbeitende Gebiet kein 3D-Modell vorliegt, wird das Vorkommen von Salzformationen im Mittleren Muschelkalk mittels thematischer Karten, geologischen Informationen und Bohrungsdaten spezifiziert.

2D-Bearbeitung

Alle verwendeten Informationen sind in einem ArcGIS-Projekt zusammengefasst. Die Auswertung der aufgeführten Daten erfolgte gemäß der im Folgenden aufgeführten Schritte.

Bohrungsaufbereitung

Die Bohrungsdaten umfassen die Basis des Rotliegenden bis zum Top des Mittleren Keuper. Alle Salzhorizonte von Zechstein bis Mittlerer Keuper in den Bohrdaten wurden

vorgefiltert. In der Excel-Tabelle der Bohrungsdaten wurde der vorgefilterte „Salz FILTER“-Datensatz ausgewählt. Die Filterauswahl erfolgte dann nach der entsprechenden Stratigraphie (Mittlerer Muschelkalk) und nach Petrographie gemäß Begriffsdefinition (Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j). Wichtig hierbei war, dass die Hauptkomponente entweder Steinsalz ($^{\wedge}$ na) ist oder andere Gesteinsarten, die überwiegend Steinsalz enthalten (siehe Begriffsbestimmung). Alle relevanten Steinsalzhorizonte wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Wenn in einer Bohrung mehrere Salzhorizonte vorkamen, wurden die Mächtigkeiten kumuliert und in einer neuen Tabelle dargestellt.

Bewertung der Salzmächtigkeit

Die Excel-Tabelle mit den Bohrungsdaten wurde in ein GIS-Projekt (WG_Salz_stratiform_mm_so_MV) eingeladen (Tabelle 73 a). Dieses Projekt wurde mit der Bearbeitung der Mindestanforderungsgebiete für Röt-Steinsalz in Mecklenburg-Vorpommern zusammengefasst und bekam daher die o.g. Bezeichnung. Zunächst wurde aus dem Shape Salzstrukturen_Inspee__v1_poly ein Shape mit allen Salzstöcken erstellt (Shape: Salzstoecke). Im GIS-Projekt wurden sodann alle Daten eingeladen, die in Tabelle 72 aufgelistet sind (Tabelle 73 b, c). Zunächst wurden alle vorgefilterten Bohrungen, die in den Diapiren bzw. vertikalen Salzstrukturen (Shape: Salzstoecke) vorkamen, aussortiert und die Bohrungen mitgeführt, die sich außerhalb der Salzstöcke befanden (Select by location; Shape: Alle_Bohrungen_MV_ausserhalb_Salzstoecke) (Tabelle 73 d, e). Basierend auf diesem Shape, wurden die Bohrungen nach Stratigraphie (Mittlerer Muschelkalk) und Petrographie ($^{\wedge}$ na) gefiltert und selektiert (Select by attributes; Shape: Bohrung_mm_na) (Tabelle 73 f). Für eine bessere Übersicht geschah dies in den Attribut-Tabellen der Bohrungen. Hierbei wurden alle Stratigraphien aussortiert, in denen Muschelkalk-Salinar nicht zu erwarten ist.

Die Bohrungen wurden auf die Salz-Mächtigkeit überprüft, da keine Depth_from-Werte angegeben sind und der Depth_to-Wert der darüber liegenden Schicht der jeweiligen Bohrung entscheidend ist (Tabelle 73 h). Nachdem man die Mächtigkeiten der Salzsichten ermittelt hat, wurden diejenigen entfernt, die sich außerhalb der Mindestanforderungstiefen (kleiner als 300 m; größer als 1500 m) befinden (Bohrung_mm_na_ausserhalb_MA) (Tabelle 73 g). Die Daten, die sich innerhalb der Suchtiefe (300–1500 m; Shape: Bohrung_mm_na_innerhalb_MA) befinden, wurden in einer Shape-Datei ausgewiesen, welche die Salzsichten repräsentieren, die geringmächtiger sind als 100 m (Shape: Bohrung_mm_na_innerhalb_MA_geringmaechtig).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator

„Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Der Mittlere Muschelkalk enthält gemäß der Inventarisierungstabelle für Mecklenburg-Vorpommern (Kapitel 5) Steinsalzhorizonte mit der Hauptkomponente Halitit, was einem nahezu reinen Steinsalz gleichzusetzen ist. Jedoch sind bei der Auswertung für den Mittleren Muschelkalk in Schichtenverzeichnissen (Tabelle 73, Nr. 5 – 7) überwiegend Mergel, Kalksteine, Sulfate und Tongesteine aufgeführt.

Wenn vorhanden, konnten nur geringmächtige Salinar-Mächtigkeiten des Mittleren Muschelkalk ermittelt werden. Zu diesen gehören die Salzhorizonte in folgenden Bohrungen:

- E Marnitz 6/6a/1960 (Mächtigkeit: 64 m; Primärkomponente: Steinsalz, Sekundärkomponente: Dolomit, Anhydrit, Ton)
- E Rütting 1E/1957 (Mächtigkeit: 49 m; Primärkomponente: Steinsalz, Sekundärkomponente: Ton)
- E Schwaan 1/1b/1976 (Mächtigkeit: 1 m; einzige Komponente: Steinsalz)

Eine weitere Differenzierung für die vorliegenden Salzhorizonte ist nicht bekannt.

Da die Salzhorizonte, mit Ausnahme der 1 m mächtigen Salzschieht, keine rein halitische Zusammensetzungen besitzen, wird für das Muschelkalk-Salinar in Mecklenburg-Vorpommern die Erfüllung der Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **wahrscheinlich nicht erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Für alle Gebiete wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbanken aus Mecklenburg-Vorpommern hinsichtlich der Steinsalz-Mächtigkeiten überprüft.

In keiner der vorliegenden Bohrungen wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ erfüllt (vgl. Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“). Es konnten keine Steinsalz-Schichten von mindestens 100 m nachgewiesen werden. Daher wird die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **wahrscheinlich nicht erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Im ganzen Landesgebiet gibt es insgesamt nur eine Bohrung mit Schichtenverzeichnis, die eine Steinsalzschieht aufweist, die die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ erfüllt. Dabei handelt es sich um die Bohrung Marnitz 6/6a/1960 (Steinsalz in 645 m bis 709 m u. GOK). Demzufolge kann die Erfüllung der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **regional erfüllt** betrachtet werden.

Zusammenfassende Beurteilung

In Mecklenburg-Vorpommern sind stratiforme Steinsalze des Muschelkalk-Salinars in der Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK nur in der Bohrung Marnitz 6/6a/1960, im südlichen Mecklenburg-Vorpommern nachgewiesen. Der entsprechende Salzhorizont ist in einer Tiefe von 645 m bis 709 m u. GOK anzutreffen und hat eine maximale Mächtigkeit von 64 m. Die Petrographie des Salzhorizonts setzt sich zusammen aus Halit als Hauptmineral und Sekundärmineralen wie Anhydrit und Dolomit sowie Beimengungen von Tonstein.

Die Bohrung in Marnitz befindet sich im paläogeographischen Ablagerungsbereich des Muschelkalk-Salinars gemäß der Verbreitungskarte aus der BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014). Jedoch erfüllen die Steinsalze in der Bohrung Marnitz sowie die anderen Bohrungen (siehe Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“) mehrere entscheidende Mindestanforderungen nicht, wie die der Mächtigkeit sowie der Gebirgsdurchlässigkeit.

Im Hinblick auf das weitere Vorgehen bzgl. des Muschelkalk-Salinars ist auch die Tatsache zu beurteilen, dass in keiner Bohrung mit vorliegendem Schichtenverzeichnis die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ auch nur annähernd erfüllt ist. Daher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es ein Gebiet gibt, das über mindestens 3 km² **alle Mindestanforderungen erfüllt, als unwahrscheinlich einzustufen.**

Aufgrund dieser Ergebnisse sind für das Muschelkalk-Salinar in Mecklenburg-Vorpommern nicht alle Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllt.

Damit entfällt eine weitere Bearbeitung des Mittleren Muschelkalk in Mecklenburg-Vorpommern und es werden keine Gebiete identifiziert. Somit kann auf die Beurteilung der Mindestanforderungen „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4) und „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5) verzichtet werden.

Ergebnis

In Abbildung 40 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Muschelkalk in Mecklenburg-Vorpommern dargestellt. Es wurden keine Gebiete, die alle Mindestanforderungen erfüllen, identifiziert.

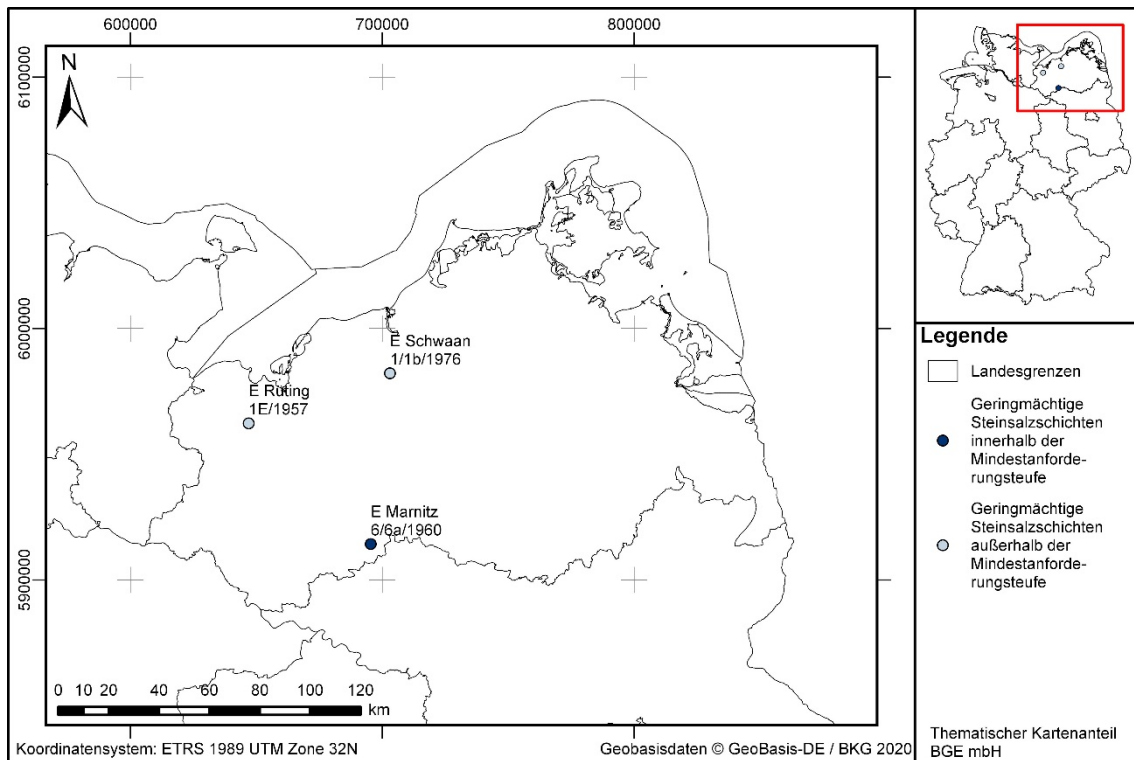


Abbildung 40: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Mittleren Muschelkalk in Mecklenburg-Vorpommern

Der Profilschnitt in Abbildung 41 veranschaulicht einen geologisch-tektonischen Schnitt von der variszischen Außenzone über die Rügen-Kaledoniden bis zum Südwestrand Balticas.

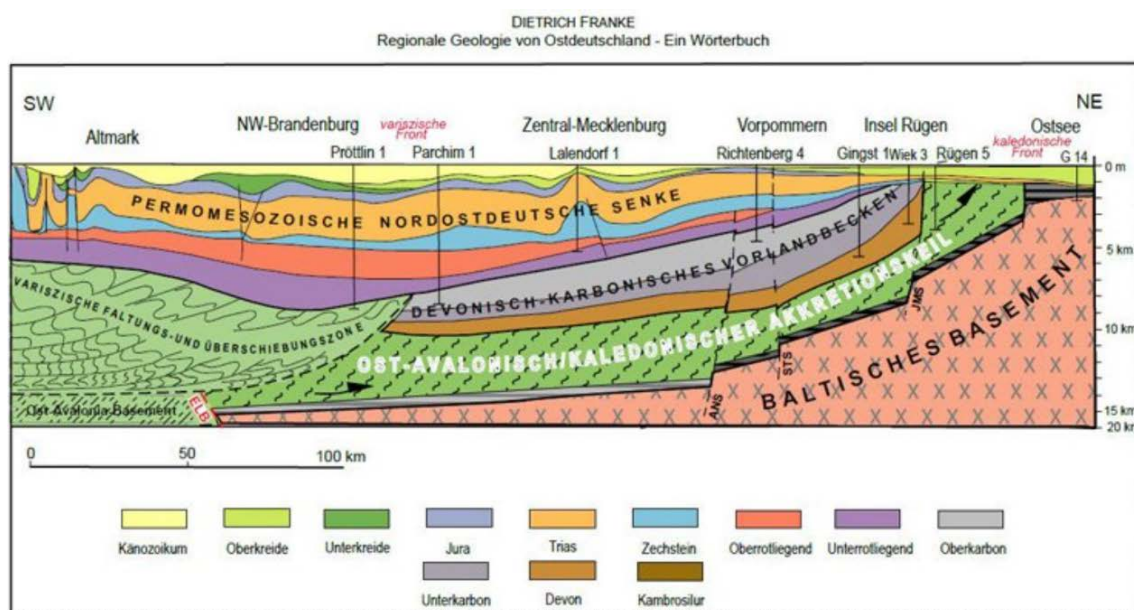


Abbildung 41: Ausschnitt aus dem SW-NE-Profilschnitt durch Mecklenburg-Vorpommern (Franke et al. 2015a)

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 74 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 74: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11888776	9164	LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang aufgelistet	Bohrdatenbank
11844870_01	6819	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Salzstrukturen	Zur Identifizierung von Salzkissenstrukturen verwendet
11844870_01	6812	Muschelkalk_Salinär	Verbreitungsgrenze	Verbreitungsgrenze des Muschelkalk-Salinars wurde als Bewertungsgrundlage verwendet

1.2.14 Mittlerer Muschelkalk – Niedersachsen, Bremen, Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkte sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Niedersachsen, Bremen und Hamburg. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Muschelkalk die Salzformationen der Heilbronn-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend wurden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in Karten visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese wurden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgte eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k)

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Mittlerer Muschelkalk, *Heilbronn-Formation*

Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Der Mittlere Muschelkalk ist die mittlere Einheit des Muschelkalk. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Niedersachsen die Heilbronn-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Muschelkalk und deren lithologische Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle Niedersachsen (Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen des Mittleren Muschelkalk sind überall in Niedersachsen verbreitet (vgl. Reinhold et al. 2014; Abb. 15, S. 40).

Geologische Beschreibung

Der Mittlere Muschelkalk ist die mittlere Einheit des Muschelkalk, der die mittlere Einheit der Trias bildet. Die sedimentäre Abfolge des Muschelkalk hat sich im Muschelkalkmeer im Germanischen Becken gebildet. Im Mittleren Muschelkalk kam es zu Regressionen (Meeresspiegelrückgänge) und Eindampfungsprozessen, die zur Ablagerung von Evaporiten (Eindampfungsgesteinen) führten. Bei jeder sedimentären Ablagerung herrschen unterschiedliche Ablagerungsbedingungen, insbesondere Meeresspiegelschwankungen. Sobald der Prozess einer charakteristischen sedimentären Ablagerung vollendet ist, hat ein Zyklus stattgefunden. Die Heilbronn-Formation umfasst die Zyklen 2 bis 8 von insgesamt 9 Sedimentationszyklen des Mittleren Muschelkalk (Brückner-Röhling 1999). Die Karlstadt-Formation bildet den ersten Zyklus.

Der Mittlere Muschelkalk besteht in zeitlicher Sedimentationsabfolge aus Dolomit, Gips, Anhydrit und Steinsalz, wobei die Karlstadt-Formation aus Dolomit und die Heilbronn-Formation aus Sulfaten/Chloriden bestehen. Steinsalzführende Schichten sind demzufolge in der Heilbronn-Formation zu erwarten (Beutler 2004).

Das Zeitfenster für das Muschelkalk-Salinar in Nordwestdeutschland ist am größten (Gärtner & Röhling 1993). Regional betrachtet ist Niedersachsen dem Norddeutschen Becken zuzuordnen, in dem Steinsalzhorizonte im Mittleren Muschelkalk vorkommen (Dünkel & Vath 1990; Röhling 2002), jedoch über ihre maximalen Mächtigkeiten keine expliziten Angaben existieren. Es sind bis zu sechs Halitlagern in den Gräben von Norddeutschland sowie des deutschen Nordsee-Sektors bekannt, die der evaporitischen Heilbronn-Formation zuzuordnen sind (Röhling 2002; Hagdorn et al. 2019). Mächtige Halitlagern im Süden von Niedersachsen sind jedoch unbekannt. Mit den Bohrungsergebnissen von Remlingen 7 konnte ein Aufschluss über die gesamte Lithologie des Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken gewonnen werden. Im Norddeutschen Becken erreicht der Mittlere Muschelkalk bis zu 150 m Mächtigkeiten (Röhling 2002), im Westdorf-Graben max. Mächtigkeiten bis zu 700 m (Hagdorn et al. 2019), konkrete Angaben zu Mächtigkeiten des Muschelkalk-Salinars liegen der BGE jedoch nicht vor.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 75). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 75: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	NI	LBEG	11842295/777 5	ts	BGE-GTA3D	3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
2	DE	BGR	11844870_01/ 6812	mpk	Muschelkalk_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
3	DE	BKG	11875056/772 8	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
4	DE	BKG	11865482/885 3	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol 10	Digitales Geländemodell
5	DE	BGR	11844870_01/ 6819	shp	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Umrisse der Salzstrukturen (von Goerne et al. 2016)
6	NI	LBEG	11881514/910 5	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 1. Teil	Bohrdatenbank
7	NI	LBEG	11881514/910 5	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 2. Teil	Bohrdatenbank

Bohrungsinformationen

Der staatliche geologische Dienst von Niedersachsen (LBEG) hat digitale Schichtenverzeichnisse zur Verfügung gestellt. Diese sind nur für einen Teil aller bekannten Bohrungen vorhanden. Die Bohrungsdaten umfassen Schichtinformationen mit Angaben zu Stratigraphie und/oder Petrographie.

Verbreitungskarte

Im BASAL-Bericht (Reinhold et al. 2014) ist die Karte „Schematische On-shore-Verbreitung der Halit-führenden Muschelkalk-Salinare in Deutschland“ (Abb. 18 auf Seite 47) enthalten. Diese erstreckt sich über ganz Hamburg und Bremen sowie weite Teile von Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Schleswig-Holstein sowie kleinere Gebiete von Sachsen-Anhalt, Thüringen, Nordrhein-Westfalen, Bayern und Baden-Württemberg. Für das Muschelkalk-Steinsalz sind nur qualitativ die Ablagerungsbereiche ohne Mächtigkeitsinformationen angegeben.

Eigenrecherche

Es wurden keine zusätzlichen thematischen Karten oder andere geologische Informationen zur Bearbeitung der Mindestanforderungen verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Muschelkalk-Salinars in Niedersachsen geprüft wurde, ist in Tabelle 76 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 76: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Röt-Muschelkalk aus der Basisfläche Röt-Muschelkalk 14_so-m (aus allen Kacheln)	b_Röt-Muschelkalk_NI.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Röt-Muschelkalk_NI_MACRORESULT.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Röt-Muschelkalk_NI_MACRORE-SULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_so-m_NI.dxf MG_s_so-m.txt
3. Integration von 2D geologischen Informationen	
a) ArcGIS Projekt	WG_Salz_stratiform_mm_NI
b) Modellfläche von Niedersachsen mit Modellfläche von Rehden ergänzen	Dissolved_Layer_NI + Dissolved_Layer_Rehden = Dissolved_Layer_NI_Rehden_merged
c) Salzvorkommen mit der Modellfläche verschneiden	mmSF_DissolvedLayer_Intersect
d) Salzstöcke (InSpEE) eliminieren	mmSF_DissolvedLayer_Intersect_NI_erase_Salzstoecke
e) Flächen kleiner als 3 km ² entfernen	mmSF_DissolvedLayer_Intersect_NI_erase_Salzstoecke_cut_3squarekm
f) Bohrdaten einladen	Alle_Bohrungen_NI_mm
g) Bohrungen filtern nach Stratigraphie und Petrographie	Alle_Bohrungen_mmSF_Na
a. Stratigraphie oder Petrographie stimmt mit Mindestanforderung überein	Alle_Bohrungen_mmSF_Na_strat_o_petro_erwiesen
b. Stratigraphie und Petrographie stimmen mit Mindestanforderung insgesamt überein	Alle_Bohrungen_mmSF_Na_insgesamt_erwiesen
c. Kumulierte Mächtigkeiten größer gleich 100 m, innerhalb Mindestanforderungsfenster, Petrographie und Stratigraphie stimmen mit Mindestanforderung überein	mmSF_Kumulierte_Maechtigkeiten_insgesamt_erwiesen_innenhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m
h) Prüfung auf Tiefenlage (300 m bis 1500 m)	Alle_Bohrungen_mmSF_Na_strat_o_petro_erwiesen_innenhalb_MA Alle_Bohrungen_mmSF_Na_insgesamt_erwiesen_innenhalb_MA

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
i) Prüfung auf Mindestanforderung (Mächtigkeit größer gleich 100 m)	Alle_Bohrun- gen_mmSF_Na_strat_o_petro_erwiesen_in- nerhalb_MA_geringmaechtig Alle_Bohrun- gen_mmSF_Na_strat_o_petro_erwiesen_in- nerhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m Alle_Bohrungen_mmSF_Na_insgesamt_er- wiesen_innerhalb_MA_geringmaechtig Alle_Bohrungen_mmSF_Na_mmNA_erwie- sen_innerhalb_MA_gleich_o_maehti- ger_100m

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 76 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell basiert auf den Daten des Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = Digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tpl = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper

- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen wurden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg ab, sowie weite Teile von Niedersachsen bis auf dessen südlichen Bereich ab Höhe Göttingen. Die Flächen des GTA3D sind in 42 Kacheln untergliedert.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 76 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen Kachel-weise vor, daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Röt-Muschelkalk Basisflächen (14_so-m) erzeugt (Tabelle 76, Nr. 2b). Allerdings sind an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermaschung) offenkundig.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 76, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 76, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht. (Tabelle 76, Nr. 2e)

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Röt-Muschelkalk (14_so-m) und der Topfläche berechnet (Tabelle 76, Nr. 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Keuper, Lias, Dogger, Oberjura und Wealden, der Unter- sowie Oberkreide, des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 76, Nr. 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300–1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 76, Nr. 2h). Des Weiteren

wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profileschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagererelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Röt-Muschelkalk (14_so-m) wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 76, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Die Steinsalzformationen der Heilbronn-Formation umfassen nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell des Landes Niedersachsen. Durch die Verwendung thematischer Karten und Bohrungsinformationen können Gebiete über die Auswertung des 3D-Modells hinaus spezifischer ausgewiesen werden, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

Die Auswertung der aufgeführten Daten erfolgte gemäß der im Folgenden aufgeführten Schritte.

Bohrdaten

Alle Salzhorizonte von Rotliegend bis Oberjura in den Bohrdaten wurden vorgefiltert und als Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt: NI_Auswahl-per-VBA-code_Mittlerer_Muschelkalk_200528.

In der Excel-Tabelle der Bohrungsdaten (s. o.) wurde der vorgefilterte „Salz FILTER“-Datensatz ausgewählt. Die Filterauswahl erfolgte dann nach der entsprechenden Stratigraphie (Oberer Buntsandstein) und nach Petrographie gemäß Begriffsdefinition. Wichtig hierbei war, dass die Hauptkomponente entweder Steinsalz ($^{\wedge}$ na) ist, oder andere Gesteinsarten, die überwiegend Steinsalz enthalten (siehe Begriffsbestimmung). Alle relevanten Steinsalzhorizonte wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Wenn in einer Bohrung mehrere Salzhorizonte vorkamen, wurden die Mächtigkeiten kumuliert. Dafür wurden vorerst alle Schichten eliminiert, die sich außerhalb des Suchteufe (kleiner als 300 m und größer als 1500 m) befinden. Für die Kumulation wurden die folgenden Schritte in Excel durchgeführt:

In Spalte A sind die Lokationsnamen der Bohrungen und in Spalte B die Mächtigkeiten eingetragen. Die folgende Formel wurde benutzt:

```
=SUM(IF(FRE-  
QUENCY(IF($A$2:$A$300=D2,MATCH($B$2:$B$300,$B$2:$B$300,0)),ROW($B$  
2:$B$300)-ROW($B$2)+1),$B$2:$B$300))
```

Spalte A beinhaltet die Werte für die Kondition. Spalte B beinhaltet die Werte, die zu kumulieren sind. In Spalte D wurde die Kondition eingetragen (also alle Lokationsnamen nur einmal) und das wird benutzt, um die Mächtigkeiten in Spalte B zu addieren. In Spalte E wurde die Formel eingefügt, z. B. Zelle E2 und Strg + Shift + Enter. Dann wurde

Zelle E2 selektiert und an der untersten rechten Ecke wurde das Kreuzchen nach unten geschoben, soweit Einträge in Spalte D vorhanden waren.

Die kumulierten Mächtigkeiten wurden in einer separaten Excel Tabelle kalkuliert.

Auswertung der thematischen Karten

Die bereits georeferenzierten thematischen Karten (Tabelle 75) wurden in ein GIS-Projekt (WG_Salz_stratiform_mm_NI) eingeladen (Tabelle 76, Nr. 3a). Die einzelnen Bearbeitungsschritte mit den resultierenden Flächen sind in Tabelle 76 aufgelistet.

Als Nächstes wurde die Basis-Fläche (DXF-Fläche) als Polygon-Featureclass eingeladen und in ein 2D-Polygon-Shape konvertiert (Tool: Dissolve (Dissolve-Feld: Layer, Shape: Dissolved_Layer_NI). Das gleiche Verfahren wurde auf die exportierte Basis-Fläche (DXF-Fläche) von Rehden angewendet. Die beiden aufgelösten Layer wurden dann zu einem Layer zusammengeführt (Tool: Merge) (Tabelle 76, Nr. 3b). Dann wurde das 2D-Polygon-Shape mit den thematischen Karten verschnitten (Tool: Intersect; Shape: mmSF_DissolvedLayer_Intersect) (Tabelle 76, Nr. 3c). Sodann wurden die Salzstöcke (Shape: Salzstrukturen_Inspee_v1_poly) innerhalb der Modellfläche entfernt (Tool: Erase, Shape: mmSF_DissolvedLayer_Intersect_NI_erase_Salzstoecke) (Tabelle 76, Nr. 3d).

Nachdem die Bewertung der Salzmächtigkeit bereits erfolgt war (siehe nachfolgende Auswertung) wurden alle Flächen eliminiert, die kleiner sind als 3 km², außer diejenigen, die an Nachbarländer grenzten (Tools: Explode Multipart Feature, Calculate Geometry in Spalte shape_area, Definition Query: Shape_Area>=3000000; Shape: mmSF_DissolvedLayer_Intersect_NI_erase_Salzstoecke_cut_3squarekm) (Tabelle 76, Nr. 3e).

Bewertung der Salzmächtigkeit

Die Tabelle mit den Bohrungsdaten von Niedersachsen wurde als Shape-Datei in das GIS-Projekt eingeladen. Sodann wurden alle Daten hinzugefügt, die in Tabelle 75 aufgelistet waren (Tabelle 76, Nr. 3f). Um die Schichten, die man bei der Bohrungsaufbereitung geprüft hat, weiter zu selektieren, wurden diese nach Stratigraphie (Mittlerer Muschelkalk) und Petrographie (^na) gefiltert (Select by attributes; Shape: Alle_Bohrungen_mmSF_Na). Für eine bessere Übersicht jedoch wurde in den Attribut-Tabellen der Bohrungen selektiert und gefiltert (Tabelle 76, Nr. 3g). Die Schichten ohne Angaben zu einem der Kriterien wurden zunächst in die nächste Filterauswahl mitgeführt. Hierbei wurden alle Stratigraphien (mmUD) aussortiert, in denen Muschelkalk-Salinar nicht zu erwarten war. Die Schichten ohne Angaben zu einem der Kriterien wurden zunächst in die nächste Filterauswahl mitgeführt (z. B. auch Evaporit als Mineralname). Nun wurden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen, in denen Steinsalzhorizonte gemäß Mindestanforderungen vorkommen konnten, wobei die zweite Möglichkeit die sichere war:

3. Alle Schichten, für die entweder Stratigraphie oder Petrographie erwiesen ist (Shape: Alle_Bohrungen_mmSF_Na_strat_o_petro_erwiesen) oder

4. Nur die Schichten wurden in Betracht gezogen, für die sowohl die passende Stratigraphie als auch die Petrographie erwiesen ist (Shape: Alle_Bohrungen_mmSF_Na_insgesamt_erwiesen).

Zusätzlich wurde die Möglichkeit mit den kumulierten Mächtigkeiten gemäß Mindestanforderungen berücksichtigt (Shape: mmSF_kumulierte_Maechtigkeiten_insgesamt_erwiesen_gleich_o_maechtiger_100m). Auch bei den kumulierten Mächtigkeiten musste die 1. Möglichkeit in Betracht gezogen werden. Da kumulierte Mächtigkeiten jedoch keinen zusammenhängenden Steinsalzhorizont bildeten, wurde von der 2. Möglichkeit, d.h. der erwiesenen Stratigraphie und Petrographie ausgegangen.

Nachdem man die Mächtigkeiten der Salzsichten ermittelt hat, wurden die Salzhorizonte eliminiert, die sich außerhalb der Mindestanforderungstiefen (kleiner als 300 m; größer als 1500 m) befinden und die restlichen wurden beibehalten (Shape: ..._innerhalb_MA) (Tabelle 76, Nr. 3h). Die Daten, die sich innerhalb des Mindestanforderungsfensters befanden, wurden in zwei Shapes unterteilt, die jeweils einmal die Salzsichten repräsentierten, die einmal geringmächtiger waren als 100 m (Shape: ..._geringmaechtig) und einmal mächtiger als 100 m (Shape: ..._gleich_o_maechtiger_100m) (Tabelle 76, Nr. 3i). Da für die Steinsalzhorizonte, innerhalb der Mindestanforderungstiefen und deren Stratigraphie und Petrographie insgesamt erwiesen waren, keine Mächtigkeiten gleich oder mächtiger als 100 m vorlagen, jedoch die Stratigraphie als Muschelkalksteinsalz bekannt war, bekamen diese Mächtigkeiten die Bezeichnung: Alle_Bohrungen_mmSF_Na_mmNA_erwiesen_innenhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die lithostratigraphische Einheit *Mittlerer Muschelkalk* hat gemäß der Inventarisierungstabelle für Niedersachsen eine evaporitische Fazies. Regional betrachtet, ist Niedersachsen dem Norddeutschen Becken zuzuordnen, in dem Steinsalzhorizonte im Mittleren Muschelkalk vorkommen (Dünkel & Vath 1990; Röhling 2002), jedoch über ihre maximalen Mächtigkeiten keine expliziten Angaben existieren. Es sind bis zu sechs Halitlagern in den Gräben von Norddeutschland sowie Nordseesektor bekannt (Röhling 2002; Hagdorn et al. 2019). Mächtige Halitlager im Süden von Niedersachsen sind jedoch unbekannt. In allen ausgewiesenen Gebieten ist Mittlerer Muschelkalk in salinärer Fazies jedoch verbreitet, daher wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **potenziell erfüllt** eingeschätzt.

*Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG*

Die Mächtigkeit des Schichtpakets Röt-Muschelkalk wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die stratigraphischen Einheiten des Röt und des gesamten Muschelkalk zusammen.

Darüber hinaus wird die Erfüllung dieser Mindestanforderung innerhalb der bereits ausgewiesenen Flächen durch Bohrungsdaten nachgewiesen, die mehrfach Mächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen. Dazu gehören folgende Bohrungen mit Mächtigkeiten größer als 100 m, für die es aber nur Angaben zur Stratigraphie und nicht zur Petrographie gibt:

- Vingerhoets 31: 129 m Mächtigkeit in 456 m Basistiefe
- Mörse 2: 111 m Mächtigkeit in 757 m Basistiefe
- B92 – Carlsglück-II, Groß Förste: 146 m Mächtigkeit in 757 m Basistiefe
- Remlingen-6: 252,6 m Mächtigkeit in 215,1 m Basistiefe
- Remlingen 8: 212,3 m Mächtigkeit in 246,3 m Basistiefe
- Remlingen-7: 160 m Mächtigkeit in 581,7 m Basistiefe
- Remlingen 5: 167,5 m Mächtigkeit in 623,5 m Basistiefe
- Salzgitter T1: 130 m Mächtigkeit in 420 m Basistiefe
- Neindorf A1: 107 m Mächtigkeit in 85 m Basistiefe

Für alle Gebiete, die nicht durch das 3D-Modell ausgewiesen werden oder nicht vom Modell abgedeckt sind, wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbank aus Niedersachsen hinsichtlich der Steinsalz-Mächtigkeiten überprüft.

Angaben nur zu Stratigraphie gegeben:

- Rehden 13: 102 m Mächtigkeit in 1439 m Basistiefe, Stratigraphie: Muschelkalk-Steinsalz
- Rehden 2 (2.) Vtfg.: 177 m Mächtigkeit in 1460 m Basistiefe, Stratigraphie: Muschelkalk-Steinsalz
- Rehden 21: 345 m Mächtigkeit in 1472 m Basistiefe, Stratigraphie: Mittlerer Muschelkalk
- Rehden 10 (1.): 115 m Mächtigkeit in 1490 m Basistiefe, Stratigraphie: Mittlerer Muschelkalk
- Salzbergen-Heidfeld 1: 110 m Mächtigkeit in 975 m Basistiefe, Stratigraphie: Mittlerer Muschelkalk

- Salzbergen-Heidfeld 1: 147,5 m Mächtigkeit in 1085 m Basistiefe, Stratigraphie: Muschelkalk-Steinsalz
- Bentheim 15: 160 m Mächtigkeit in 547 m Basistiefe, Stratigraphie: Mittlerer Muschelkalk
- Eitzendorf T1: 179 m Mächtigkeit in 1441 m Basistiefe, Stratigraphie: Mittlerer Muschelkalk

Für kumulierte Mächtigkeiten größer gleich als 100 m, bei denen Stratigraphie oder Petrographie zutreffen oder Stratigraphie als Muschelkalk-Steinsalz zutrifft und sich in Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m befinden:

- 45 Schichtinformationen in 20 Bohrungen

Salzhorizonte, die sowohl die relevante Tiefenlage als auch die erforderliche Mächtigkeit aufweisen, deren Stratigraphie (mm oder mmNA) und Petrographie (^{na}) erwiesen sind, existieren laut den Bohrungsergebnissen in Niedersachsen jedoch nicht. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass Steinsalz-Mächtigkeiten größer gleich als 100 m in Südniedersachsen existieren können (siehe Tabelle XX im Anhang). Angesichts der unzureichenden Angaben ist diese Vermutung mit Vorsicht zu betrachten, insbesondere für die ausgewiesenen Gebiete im Süden Niedersachsens.

Daher wird in allen ausgewiesenen Gebieten die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **potentiell erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Die Tiefenlage des Röt-Muschelkalk (14_{so}-m) wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Demzufolge wird in allen ausgewiesenen Gebieten mit GTA-3D-Abdeckung die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** eingestuft. Diese Vermutung wird durch die Bohrungsdaten, die Steinsalzen in der entsprechenden Tiefenlage aufweisen, bekräftigt. Dazu gehört z. B. die Auflistung, die in „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ dargestellt wurde.

Für alle Gebiete, die nicht durch das 3D-Modell abgedeckt sind, wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbank aus Niedersachsen hinsichtlich der Tiefenlage der Steinsalz-Horizonte überprüft.

Da innerhalb der ausgewiesenen Gebiete sehr viele Bohrungen in Niedersachsen (siehe Tabelle XX im Anhang) Steinsalz in Teufen zwischen 300 m und 1500 m aufweisen, wird die Erfüllung der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Zusammenfassend lässt sich bewerten, dass, obwohl die Auswertung der 3D-Modelle und Bohrungen für die Ausweisung aller Gebiete in Niedersachsen sprechen, aus der Inventarisierungstabelle explizite Angaben über Steinsalzhorizonte im Süden von Niedersachsen bzgl. der Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des ewG“ nicht eindeutig hervorgehen. Die Erfüllung der besagten Mindestanforderung trifft eher auf die ausgewiesenen Gebiete im Norden zu (siehe „Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit“).

Somit sind in allen resultierenden Gebieten zum jetzigen Zeitpunkt alle Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG potentiell erfüllt.

Ergebnis

In Abbildung 42 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Mittlerer Muschelkalk in Niedersachsen dargestellt.

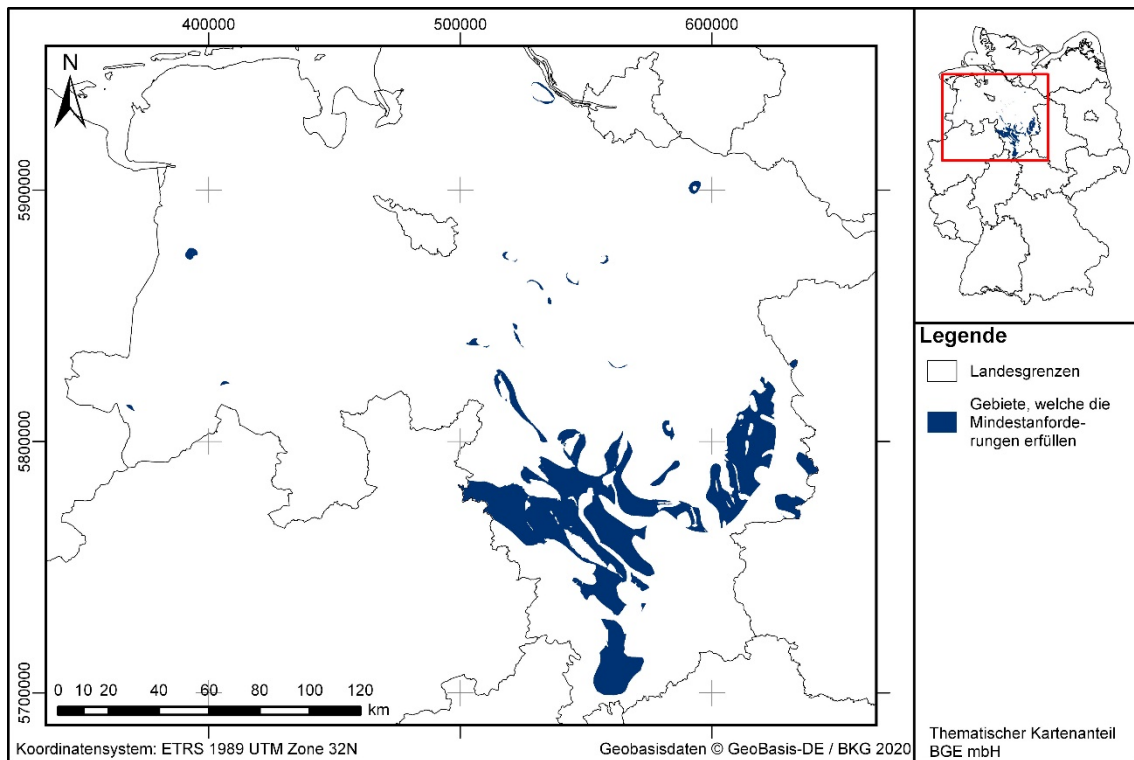


Abbildung 42: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Mittleren Muschelkalk in Niedersachsen, Bremen und Hamburg

Der Profilschnitt in Abbildung 43 veranschaulicht einen geologischen Schnitt von der Elbe bis zu den südlichen Höhenzügen von Hannover sowie ein Übergangsgebiet von der Hebungszone entlang der Elbe-Störungszone bis zu den flachen Salzstrukturen des zentralen Norddeutschen Beckens.

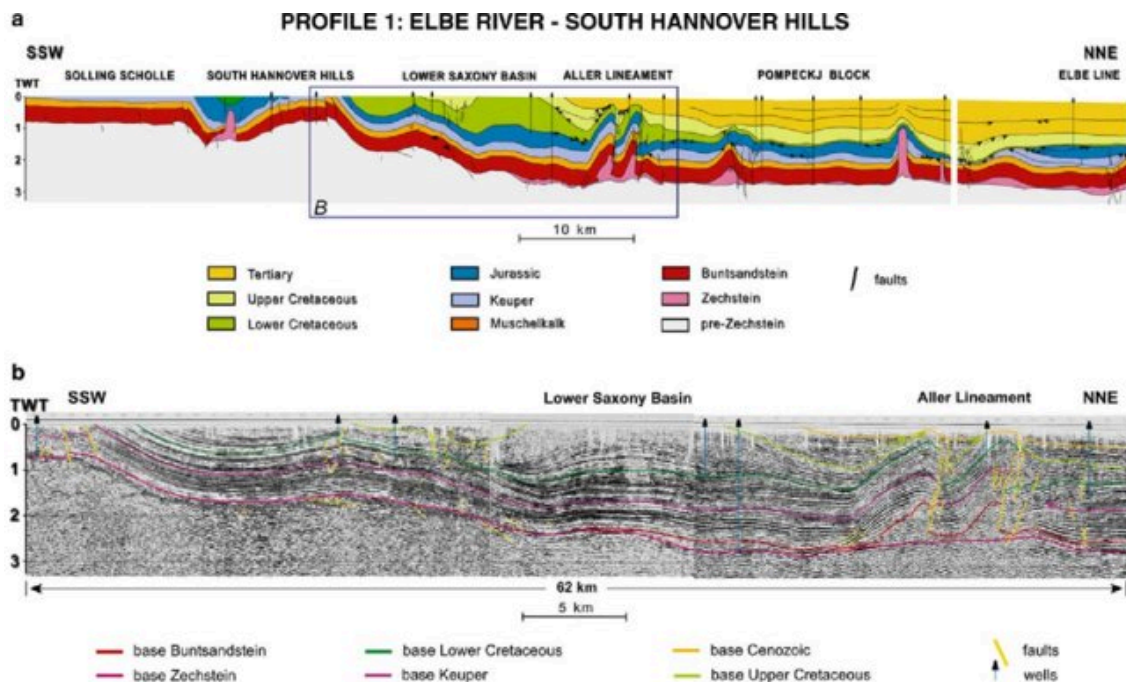


Abbildung 43: *Geologischer Profilschnitt der südwestlichen Region des Norddeutschen Beckens, basierend auf seismischen Daten (Mazur et al. 2005)*

Eine Auflistung der Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 77 zu finden.

Tabelle 77: *Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, Bremen und Hamburg, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche*

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_mm_NI_01	41
MG_s_mm_NI_02	3
MG_s_mm_NI_03	21
MG_s_mm_NI_04	29
MG_s_mm_NI_05	2018
MG_s_mm_NI_06	19
MG_s_mm_NI_07	4
MG_s_mm_NI_08	3
MG_s_mm_NI_09	709
MG_s_mm_NI_10	79
MG_s_mm_NI_11	3
MG_s_mm_NI_12	7
MG_s_mm_NI_13	9
MG_s_mm_NI_14	5
MG_s_mm_NI_15	3
MG_s_mm_NI_16	3
MG_s_mm_NI_17	5
MG_s_mm_NI_18	5
MG_s_mm_NI_19	4
MG_s_mm_NI_20	4
MG_s_mm_NI_21	16
MG_s_mm_NI_22	16
MG_s_mm_NI_23	14
MG_s_mm_NI_24	14
MG_s_mm_NI_25	15
MG_s_mm_NI_26	15

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_mm_NI_27	5
MG_s_mm_NI_28	67
MG_s_mm_NI_29	335

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 78 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 78: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11842 295	7775	BGE-GTA3D		Verwendetes 3D-Modell
11844 870_0 1	6812	Muschelkalk_Salinar	Verbreitungsgrenze	Verbreitungsgrenze des Muschelkalk-Salinars wurde in Südniedersachsen zur unmittelbaren Grenzziehung verwendet
11881 514	9105	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 1. Teil + 2. Teil	Schichtenverzeichnisse der als entscheidungserheblich eingestuften Bohrungen sind in Anhang aufgelistet	Bohrdatenbank
11844 870_0 1	6819	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Salzstrukturen	Umrisse der Salzstrukturen zur Grenzziehung verwendet

1.2.15 Mittlerer Muschelkalk – Schleswig-Holstein

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkte sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Schleswig-Holstein. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) die Salzformationen der Heilbronn-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend wurden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Schleswig-Holstein, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese wurden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgte eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Mittlerer Muschelkalk: Lithostratigraphie: *Heilbronn Formation*

Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Der Mittlere Muschelkalk ist die mittlere Einheit des Muschelkalk. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Schleswig-Holstein die Heilbronn-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Mittleren Muschelkalk und deren lithologische Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle Schleswig-Holstein (Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Das Muschelkalk-Salinar (Mittlerer Muschelkalk) ist überall in Schleswig-Holstein verbreitet mit Ausnahme der Gebiete nördlich von Schleswig sowie nordöstlich von Fehmarn (siehe Reinhold et al. 2014; Abb. 15, S. 40).

Geologische Beschreibung

Die stratigraphische Abfolge des Muschelkalk hat sich im Muschelkalkmeer im Germanischen Becken gebildet. Im Mittleren Muschelkalk kam es zu Regressionen (Meeresspiegelrückgänge) und Eindampfungsprozessen, die zur Ablagerung von Evaporiten (Eindampfungsgesteinen) führten. Bei jeder sedimentären Ablagerung herrschen unterschiedliche Ablagerungsbedingungen, insbesondere Meeresspiegelschwankungen. Sobald der Prozess einer charakteristischen sedimentären Ablagerung vollendet ist, hat ein Zyklus stattgefunden. Die Heilbronn-Formation umfasst die Zyklen 2 bis 8 von insgesamt 9 Sedimentationszyklen des Mittleren Muschelkalk (Brückner-Röhling 1999). Die Karlstadt-Formation bildet den ersten Zyklus. Der Mittlere Muschelkalk besteht in zeitlicher Sedimentationsabfolge aus Dolomit, Gips, Anhydrit und Steinsalz, wobei die Karlstadt-Formation aus Dolomit und die Heilbronn-Formation aus Sulfaten/Chloriden bestehen. Steinsalzführende Schichten sind demzufolge in der Heilbronn-Formation zu erwarten (Beutler 2004). Das Zeitfenster für das Muschelkalk-Salinar in Nordwestdeutschland ist am größten (Gärtner & Röhling 1993). Es sind bis zu sechs Halitlagern in Gräben Norddeutschlands und des deutschen Nordsee-Sektor zu verzeichnen, die der evaporitischen Heilbronn-Formation zuzuordnen sind (Hagdorn et al. 2019). Mit den Bohrungsergebnissen von Remlingen 7 konnte ein Aufschluss über die gesamte Lithologie des Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken gewonnen werden. Im Norddeutschen Becken erreicht der gesamte Mittlere Muschelkalk bis zu 150 m Mächtigkeit (Röhling 2002), im Westdorf-Graben max. Mächtigkeiten bis zu 700 m (Hagdorn et al. 2019), konkrete Angaben zu Mächtigkeiten des Muschelkalk-Salinars liegen der BGE jedoch nicht vor.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 79). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 79: *Auflistung aller verwendeten Daten*

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	SH	LLUR	11839735/6220	pl/ts	3D_Basismodell_SH	3D Basismodell SH (Hese et al. 2012)
2	DE	BGR	11844870_01/6812	mpk	Muschelkalk_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
3	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
4	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol 10	Digitales Geländemodell
5	DE	BGR	11844870 _01/6819	shp	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Umrisse der Salzstrukturen (von Goerne et al. 2016)
6	DE	BGR	11844870 _01/6822	shp	Salzkeile_V1_poly	Verbreitungskarte
7	SH	LLUR	11873390/ 7714	mdb	Archiv_LLURgr300	Bohrdatenbank
8	SH	LLUR	11873390/ 7713	mdb	KW_Daten	Bohrdatenbank
9	SH	LLUR	11874951/ 7723	ts	Störtief: StM_	3D-Modell (Thomsen et al. 2017)

Bohrungsinformationen

Der staatliche geologische Dienst von Schleswig-Holstein (LLUR) hat digitale Schichtenverzeichnisse zur Verfügung gestellt. Diese sind nur für einen Teil aller bekannten Bohrungen vorhanden. Die Bohrungsdaten umfassen Schichtinformationen mit Angaben zu Stratigraphie und/oder Petrographie.

Verbreitungskarte

Im BASAL-Bericht (Reinhold et al. 2014) ist die Karte „Schematische On-shore-Verbreitung der Halit-führenden Muschelkalk-Salinare in Deutschland“ (Abb. 18 auf Seite 47) enthalten. Diese erstreckt sich über ganz Hamburg und Bremen sowie weite Teile von Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Schleswig-Holstein sowie kleinere Gebiete von Sachsen-Anhalt, Thüringen, Nordrhein-Westfalen, Bayern und Baden-Württemberg. Für das Muschelkalk-Steinsalz sind nur qualitativ die Ablagerungsgebiete ohne Mächtigkeitsinformationen angegeben.

Eigenrecherche

Es wurden keine zusätzlichen thematischen Karten oder andere geologische Informationen zur Bearbeitung der Mindestanforderungen verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Muschelkalk in Schleswig-Holstein geprüft wurde, ist in Tabelle 80 aufgelistet. Zudem wurden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 80: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Röt/Muschelkalk aus der Basisfläche Oberer Buntsandstein	b_Roet_Muschelkalk_SH.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Roet_Muschelkalk_SH_MACRORE-SULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Roet_Muschelkalk_SH_MACRORE-SULT_qs.ts
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_Roet_m_SH.dxf MG_s_Roet_m_SH.txt
3. Integration von 2D geologischen Informationen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) ArcGIS Projekt	WG_Salz_stratiform_mm_SH
b) Thematische Karte (Reinhold et al. 2014) einladen	Palaeogeogr_mmSF
c) Salzvorkommen mit der Modellfläche verschneiden	mmSF_Dissolved_Layer_Intersect
d) Salzstöcke (InSpEE) eliminieren (von Goerne et al. 2016)	mmSF_Dissolved_Layer_Intersect_erase_Salzstoecke
e) Flächen kleiner als 3km ² entfernen	mmSF_Dissolved_Layer_Intersect_erase_Salzstoecke_cut_3squarekm
f) Bohrdaten einladen	Alle_Bohrungen_SH
g) Bohrungen filtern nach Stratigraphie und Petrographie	Alle_Bohrungen_mm_Na
h) Prüfung auf Suchteufe (300 m bis 1500 m)	Alle_Bohrungen_mm_Na_innenhalb_MA
i) Prüfung auf Mindestanforderung (Mächtigkeit größer gleich 100 m)	Alle_Bohrungen_mm_Na_innenhalb_MA_geringmaechtig

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 80 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Hier wurde das Basismodell SH (Hese et al. 2012) verwendet, da der Bearbeitungsraum des Modells größer ist als im ebenso vorliegenden StörTief-Modell. Da Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, auch außerhalb des Modellumfangs des StörTief-Modells zu erwarten waren, wurde auf die Verwendung ebendieses abgesehen.

Das Basismodell SH ist ein erstes geologisches 3D-Modell des Geologischen Dienstes Schleswig-Holstein (des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume LLUR) aus dem Jahr 2012. Zur Bearbeitung des Modells wurden Daten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland herangezogen (Baldschuhn et al. 2001). Störungsflächen wurden nicht als durchgehende Flächen ausgehalten, sondern lediglich als vertikale Versätze dargestellt. Das modellierte Gebiet umfasst das komplette Bundesland Schleswig-Holstein inklusive der 12-Seemeilen-Zone. Folgende Flächen wurden hauptsächlich als Basisflächen modelliert:

- GTA3D_00_Topographie: Geländeoberfläche
- GTA3D_01_Basis_TmiR: Mittleres Miozän
- GTA3D_02_Basis_TmiU: Miozän

- GTA3D_03_Basis_ToIM: Mittleres Oligozän
- GTA3D_04_Basis_TeoM: Mittleres Eozän
- GTA3D_05_Basis_TpaO: Oberes Paläozän
- GTA3D_06_Basis_KrO: Obere Kreide
- GTA3D_07_Basis_KrU: Untere Kreide
- GTA3D_08_Basis_JO: Oberer Jura
- GTA3D_09_Basis_JM: Mittlerer Jura
- GTA3D_10_Basis_JU: Unterer Jura
- GTA3D_11_Basis_K: Keuper
- GTA3D_12_Basis_SO: Oberer Buntsandstein
- GTA3D_13_Basis_SU: Unterer Buntsandstein
- GTA3D_14_Basis_Z: Zechstein
- GTA3D_Salzdiapire: Hüllflächen der Salzstrukturen

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 80 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Bearbeitungsfläche Roet_Muschelkalk wurde aus der Basisfläche Oberer Buntsandstein erzeugt (Tabelle 80, Nr. 2b). Diese Fläche stellt die nächstgelegene stratigraphische Basisfläche des Muschelkalk dar.

Das digitale Geländemodell für Schleswig-Holstein wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 80, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 80, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 80, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Roet_Muschelkalk und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Keuper (nächste nachfolgende Basisfläche) sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 80, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 80, Nr. 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300–1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 80, Nr. 2h). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profileschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Roet_Muschelkalk wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 80, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Die Salzformationen des Mittleren Muschelkalk umfassen nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell des Landes Schleswig-Holstein. Durch die Verwendung thematischer Karten und Bohrungsinformationen können Gebiete über die Auswertung des 3D-Modells hinaus spezifischer ausgewiesen werden, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

Die Auswertung der aufgeführten Daten erfolgte gemäß der im Folgenden aufgeführten Schritte.

Bohrdaten

Alle Salzhorizonte von Rotliegend bis Keuper in den Bohrdaten wurden vorgefiltert und als Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt: SH_KW__Salz__GID__Auswahl-per-VBA-code_neu20200420_test2.

In der Excel-Tabelle der Bohrungsdaten (s. o.) wurde der vorgefilterte „Salz FILTER“-Datensatz ausgewählt. Die Filterauswahl erfolgte dann nach der entsprechenden Stratigraphie (Mittlerer Muschelkalk) und nach Petrographie gemäß Begriffsdefinition. Wichtig hierbei war, dass die Hauptkomponente entweder Steinsalz (^na) ist, oder andere Gesteinsarten, die überwiegend Steinsalz enthalten (siehe Begriffsbestimmung). Alle relevanten Steinsalzhorizonte wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Wenn in einer Bohrung mehrere Salzhorizonte vorkamen, wurden die Mächtigkeiten kumuliert.

Auswertung der thematischen Karten

Die bereits georeferenzierte thematische Karte (Tabelle 79, Nr. 2) wurde in ein GIS-Projekt (WG_Salz_stratiform_mm_SH) eingeladen (Shape: Palaeogeogr_mmSF). Die einzelnen Bearbeitungsschritte mit den resultierenden Flächen sind in Tabelle 80 aufgelistet.

Als Nächstes wurde die Basis-Fläche (DXF-Fläche) als Polygon-Featureclass eingeladen und in ein 2D-Polygon-Shape konvertiert (Tool: Dissolve (Dissolve-Feld: Layer, Shape: Dissolved_Layer) (Tabelle 80, Nr. 3b). Dann wurde das 2D-Polygon-Shape mit

der thematischen Karte verschnitten (Tool: Intersect; Shape: mmSF_Dissolved_Layer_Intersect) (Tabelle 80, Nr. 3c). Sodann wurden die Salzstöcke (Shape: Salzstrukturen_Inspee_v1_poly) innerhalb der Modellfläche entfernt (Tool: Erase, Shape: mmSF_Dissolved_Layer_Intersect_erase_Salzstoecke) (Tabelle 80, Nr. 3d).

Nachdem die Bewertung der Salzmächtigkeit bereits erfolgt war (siehe nachfolgende Auswertung), wurden alle Flächen eliminiert, die kleiner sind als 3 km², außer diejenigen, die an Nachbarländer grenzen (Tools: Explode Multipart Feature, Calculate Geometry in Spalte shape_area, Definition Query: Shape_Area>=3000000; Shape: mmSF_Dissolved_Layer_Intersect_erase_Salzstoecke_cut_3squarekm) (Tabelle 80, Nr. 3e).

Bewertung der Salzmächtigkeit

Die Tabelle mit den Bohrungsdaten von Schleswig-Holstein wurde als Shape-Datei in das GIS-Projekt eingeladen (Tabelle 80, Nr. 3f). Sodann wurden alle Daten hinzugefügt, die in Tabelle 79 aufgelistet sind. Vorab wurden alle Bohrungen, die sich innerhalb der Salzstöcke (Layer: Salzstrukturen_Inspee_v1_poly) befinden, gelöscht. Um die Schichten, die man bei der Bohrungsaufbereitung geprüft hat, weiter zu selektieren, wurden diese nach Stratigraphie (Mittlerer Muschelkalk) und Petrographie (^na) gefiltert (Select by attributes; Shape: Alle_Bohrungen_mm) (Tabelle 80, Nr. 3g). Für eine bessere Übersicht jedoch wurde in den Attribut-Tabellen der Bohrungen selektiert und gefiltert. Die Schichten ohne Angaben zu einem der Kriterien wurden zunächst in die nächste Filterauswahl mitgeführt.

Nachdem man die Mächtigkeiten der Salzsichten ermittelt hat, wurden die Salzhorizonte eliminiert, die sich außerhalb der Mindestanforderungstiefen (kleiner als 300 m; größer als 1500 m) befanden und die restlichen werden beibehalten (Shape: ..._innerhalb_MA) (Tabelle 80, Nr. 3h). Die Daten, die sich innerhalb des Mindestanforderungsfensters befanden, wurden in zwei Shapes unterteilt, die jeweils einmal die Salzsichten repräsentieren, die einmal geringmächtiger waren als 100 m (Shape: ..._geringmaechtig) und einmal mächtiger waren als 100 m (Shape: ..._gleich_o_maechtiger_100m) (Tabelle 80, Nr. 3i).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10⁻²¹ m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10⁻¹² m/s und weniger.

Die lithostratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk in Norddeutschland setzt sich gemäß der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) aus den Diemel-, Heilbronn- und Karstadt-

Formationen zusammen und bildet insgesamt eine Mächtigkeit von max. 700 m, wobei ausschließlich die Heilbronn-Formation in Schleswig-Holstein steinsalzführend ist. Zudem existieren bis zu sechs Halitlager in Gräben Norddeutschlands und des Nordsee-Sektors. In den ausgewiesenen Gebieten, wo Mittlerer Muschelkalk verbreitet ist und Steinsalze mit mindestens 100 m Mächtigkeit zu vermuten sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **regional erfüllt** eingeschätzt.

*Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG*

Die Mächtigkeit des Muschelkalkes wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheiten des Röt sowie des Muschelkalk zusammen.

Es wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbank aus Schleswig-Holstein hinsichtlich der Steinsalz-Mächtigkeiten überprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass in keiner Bohrung mit vorliegendem Schichtenverzeichnis die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ mit Steinsalz-Mächtigkeiten gleich oder mehr als 100 m erfüllt wurde (vgl. Tabelle XX im Anhang). Es gibt daher keinen belastbaren Beleg, dass das Muschelkalk-Salinar in Schleswig-Holstein ausreichend hohe Mächtigkeiten aufweisen kann. Die maximale nachgewiesene Steinsalz-Mächtigkeit liegt bei 32 m in Bohrung 1618/01/0001/E (Abk.: WHEV 2T). Da aber nur für einen Teil der Bohrungen in Schleswig-Holstein Schichtenverzeichnisse vorliegen, ist es theoretisch möglich, dass regional auch höhere Mächtigkeiten erreicht werden können.

Daher wird die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für den Mittleren Muschelkalk in Schleswig-Holstein als **wahrscheinlich nicht erfüllt** betrachtet.

*Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG*

Die Tiefenlage der Unterkante des Schichtpakets Röt bis Muschelkalk wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Demzufolge wird in allen ausgewiesenen Gebieten die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** eingestuft.

Es wurden die Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbank aus Schleswig-Holstein hinsichtlich der Tiefenlage der Steinsalz-Horizonte überprüft.

Folgende kumulierte Steinsalzhorizonte der Bohrungen erfüllen die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (vgl. Tabelle XX im Anhang):

- 1520/13/0001/E (Abk.: 2): 32,8 m Mächtigkeit in 1320 m Basistiefe u. GOK

- 1520/17/0001/E o. 1520/17/0002/E (Abk.: MILDZ1 o. Z1 (2.)): 40 m Mächtigkeit in 1243 m Basistiefe u. GOK
- 1618/01/0001/E (Abk.: WHEV 2T): 32 m Mächtigkeit in 1340 m Basistiefe u. GOK

Zusammenfassend geht aus den Ergebnissen hervor, dass nur innerhalb der 3D-Modellflächendaten die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet werden kann.

Zusammenfassende Bewertung

In Schleswig-Holstein wurden nur in drei der vorliegenden Bohrungen mit digitalen Schichtenverzeichnissen Steinsalze in der gesuchten Teufenlage von 300 m – bis 1500 m u. GOK angetroffen. Die nachgewiesenen Mächtigkeiten des Steinsalzes liegen mit 32 m ebenfalls deutlich unterhalb der geforderten Mächtigkeit von 100 m.

Im Hinblick auf das weitere Vorgehen bzgl. des Muschelkalk-Salinars ist auch die Tatsache zu beurteilen, dass in keiner Bohrung mit vorliegendem Schichtenverzeichnis die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ auch nur annähernd erfüllt ist. Daher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es ein Gebiet gibt, das über mindestens 3 km² alle Mindestanforderungen erfüllt, **als unwahrscheinlich** einzustufen.

Aufgrund dieser Ergebnisse sind für das Muschelkalk-Salinar in Schleswig-Holstein nicht alle Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllt.

Damit entfällt eine weitere Bearbeitung des Mittleren Muschelkalk in Schleswig-Holstein und es werden keine Gebiete identifiziert. Somit kann auf die Beurteilung der Mindestanforderungen „Fläche des Endlagers“ (Nr.4) und „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5) verzichtet werden.

Ergebnis

In Abbildung 44 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Muschelkalk in Schleswig-Holstein dargestellt. Es wurden keine Gebiete, die alle Mindestanforderungen erfüllen, identifiziert.

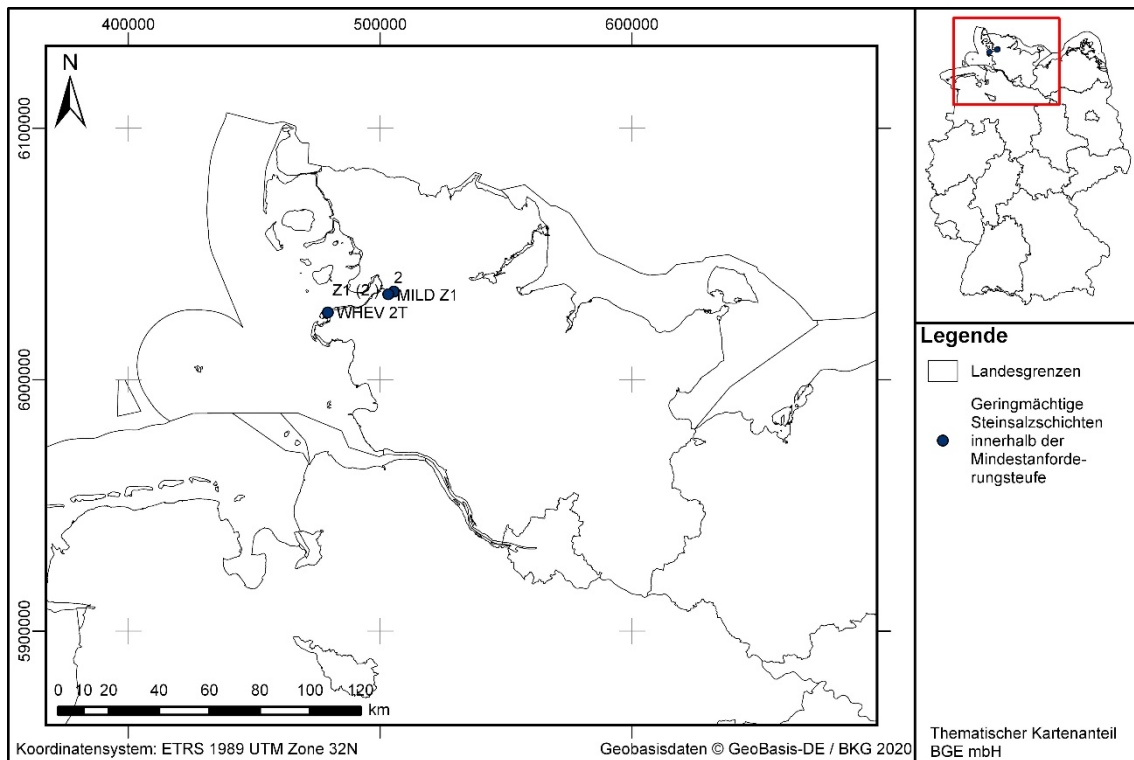


Abbildung 44: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für den Mittleren Muschelkalk in Schleswig-Holstein

Das Querprofil in Abbildung 45 veranschaulicht einen Ausschnitt des Norddeutschen Beckens. Der Unterbau wird von Süden nach Norden von Variszischem, Kaledonischem und Baltischem Grundgebirge gebildet. Seit Karbon ist nahezu ein einheitlicher Sedimentationsraum vorzufinden. Die Struktur des postkarbonen Untergrunds ist durch Halokinese der Rotliegend- und Zechsteinsalinare deutlich beeinflusst.

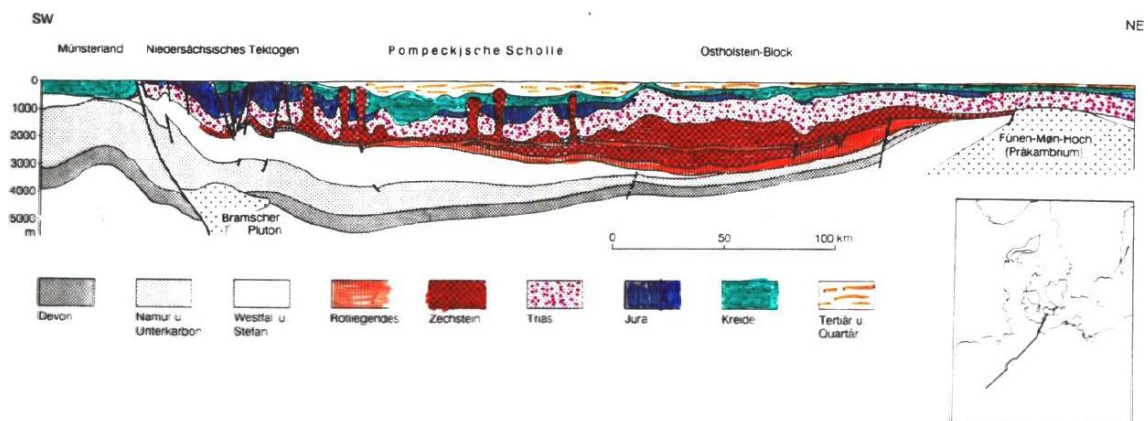


Abbildung 45: Ausschnitt aus dem SW-NE-Profilsschnitt durch Schleswig-Holstein (Walter 2007)

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 81 sind alle Daten aufgeführt, die für die Anwendung der Mindestanforderung als entscheidungserheblich eingestuft werden. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 81: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11874951	7723	Störtief: StM_		Verwendetes 3D-Modell
11873390	7714	Archiv_LLURgr300	Schichtenverzeichnisse der als entscheidungserheblich eingestuft Bohrungen sind in Anhang zu finden	Bohrdatenbank
11873390	7713	KW_Daten	Schichtenverzeichnisse der als entscheidungserheblich eingestuft Bohrungen sind in Anhang zu finden	Bohrdatenbank
11844870_01	6812	Muschelkalk-Salinar	Verbreitungsgrenze	Verbreitungsgrenze des Muschelkalk-Salinars

1.2.16 Mittlerer Keuper – Mecklenburg-Vorpommern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Mecklenburg-Vorpommern. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Keuper die Salzformationen der Grabfeld- und Weser-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse dargestellt. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Mittlerer Keuper, *Grabfeld- und Weser-Formation*

Der Keuper ist eine Gruppe der Trias. Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Es wird zwischen dem Unteren, Mittleren und Oberen Keuper unterschieden. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Mecklenburg-Vorpommern die Grabfeld- (Unterer Gipskeuper) und die Weser-Formation (Oberer-Gipskeuper) des Mittleren Keuper betrachtet. Zwischen den beiden Formationen tritt die Stuttgart-Formation (Schilfsandstein) auf, die aus terrigenen Sedimenten besteht. Sie setzt sich überwiegend aus Sand-, Ton- und/oder Siltstein zusammen (Bachmann et al. 2008).

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Keuper und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Mecklenburg-Vorpommern entnommen werden (siehe Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen der Grabfeld- und Weser-Formation sind in Mecklenburg-Vorpommern vor allem im Nordwesten im Raum Grevesmühlen und Mirow verbreitet.

Geologische Beschreibung

Die Grabfeld-Formation kommt in Mecklenburg-Vorpommern als kleinzyklisch aufgebaute Evaporit-Abfolge aus vorwiegend bunten Tonsteinen, durchsetzt von knolligen oder massigen Anhydrit-Lagen und untergeordnet Dolomit-Bänken, vor. Die Mächtigkeit beträgt 120-200 m (Beutler 2004).

Die Weser-Formation besteht aus rotbraunen, massigen Tonsiltsteinen mit Lagen von knolligem und massigem Anhydrit und selten Dolomit-Lagen. In der Weser-Formation treten Steinsalz-Lagen nur im Raum Grevesmühlen und Mirow auf. Die Steinsalzlager können bis 120 m mächtig werden (Beutler 2004).

Die Mächtigkeit der Steinsalzlager sind regional starken Schwankungen ausgesetzt. Steinsalzlager A ist in Nordwestdeutschland häufig das mächtigste Steinsalzlager der Grabfeld-Formation. Es besteht zumeist aus geringmächtigen Steinsalzlagen und einer Wechsellagerung mit Tonsteinen und Anhydriten. Die Steinsalzlager B und C der Grabfeld-Formation sind häufig ungegliedert, aber nur geringmächtig ausgebildet. Die Lager D und E können Doppelsalinare bis 70 m Mächtigkeit bilden und sind zumeist durch ein geringmächtiges Tonsteinmittel untergliedert. Die Steinsalzlager F und G der Weser-Formation sind häufig geringmächtig ausgebildet und weisen viele anhydritische Einschaltungen auf. Das Steinsalzlager H hingegen kann Mächtigkeiten von mehreren Hundert Metern erreichen, wobei auch hier starke Schwankungen in den Mächtigkeiten zu erwarten sind. Es ist gekennzeichnet durch nur wenige tonige und anhydritische Lagen. Ein weiteres Merkmal des Lagers H ist die durch halokinetische Prozesse begründeten Ansammlungen des Steinsalzes in Salzkissenform (Reinhold et al. 2014).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 82). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 82: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BGR	11844870_01/6815	mpk	Keuper_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
2	DE	BGR	11842726/7610	shp	190_k_iso	Tiefenlinienplan <i>Top Keuper</i> aus SPBA (TNO - Geological Survey of the Netherlands 2010)
3	DE	BGR	11842726/7612	shp	200_so_iso	Tiefenlinienplan <i>Top Oberer Buntsandstein</i> aus SPBA (TNO - Geological Survey of the Netherlands 2010)
4	MV	LUNG	11886665/9022	xlsx	LUNG_Daten_Bohrungen_SVZ_BLM_Teil_1	Bohrungsdaten
5	MV	LUNG	11886665/9022	xlsx	LUNG_Daten_Bohrungen_SVZ_BLM_Teil_2	Bohrungsdaten
6	MV	LUNG	11888776/9164	mdb	LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06	Bohrdatenbank

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 82 genannten Eingangsdaten wurden folgende thematische Karten verwendet:

Beutler, G., Hauschke, N., Nitsch, E. & Vath, U. (2005): *Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper*. Frankfurt am Main: Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg ISBN 978-3-510-61376-2:

1. Paläogeographische Karte der Grabfeld-Formation (Abb. 3-6 auf S. 25)
2. Paläogeographische Karte der Weser-Formation (Abb. 3-8 auf S. 27)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Keuper-Salinars in Mecklenburg-Vorpommern geprüft wurde, ist in Tabelle 83 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 83: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Erstellen eines GIS-Projektes; vektorisieren und einladen der in Tab. 1 genannten Daten	
2. Zusammenfügen von WG_Salz_stratiform_Keuper_Grabfeld_Fm mit WG_Salz_stratiform_Keuper_Weser_Fm (Beutler et al. 2005)	WG_Salz_stratiform_Keuper_gesamt (Beutler 2005)
3. Das Vorkommen von Keupersalz aus Beutler WG_Salz_stratiform_Keuper_gesamt wird zu dem Keupersalzvorkommen aus BASAL Keuper_Salinar_BASAL gefügt (Reinhold et al. 2014)	WG_Keuper_gesamt
4. Auswertung der Bohrungen	Keine Bohrung in Gebieten mit möglichem Keupersalinar zeigt Steinsalze, welche die Mindestanforderungen erfüllen
5. Auswertung von Teufeninformationen aus dem SPBA (190_k_iso) (TNO - Geological Survey of the Netherlands 2010)	Die Mindestanforderungen an die Teufe wird nicht erfüllt

Bearbeitung im 3D-Modell

Da für das zu bearbeitende Gebiet kein 3D-Modell vorliegt, wird das Vorkommen von potenziell geeigneten Salzformationen mittels thematischen Karten, Bohrungsdaten und geologischen Informationen spezifiziert.

2D-Bearbeitung

Alle verwendeten Informationen sind in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengefasst. Die einzelnen Schritte sind der Tabelle 83 zu entnehmen.

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (*3_Keuper_MV*) und die in Kapitel „Eingangsdaten“ aufgeführten Karten und Studien nutzbar gemacht, ggf. vektorisiert und eingeladen (Tabelle 83, Nr. 1).

Die Karten wurden in mehreren Schritten miteinander verschnitten (Tabelle 83, Nr. 1-3):

Um Gebiete auszuweisen, in denen Keuper-Salinar vorkommt, wurden die paläogeographischen Karten der Grabfeld- und Weser-Formation aus Beutler (2005) verschnitten und anschließend mit den Karten des Keuper-Salinars aus Reinhold et al. (2014) zusammengefügt (Tabelle 83, Nr. 2 und 3).

Es ergeben sich 2 Flächen in Mecklenburg-Vorpommern. Eine im Nordwesten bei Grevesmühlen und eine südlich des Müritz-Seen-Parks an der Grenze zu Brandenburg.

Um nähere Informationen zu diesen Gebieten zu erhalten, wurden die zuvor gefilterten Bohrungen zu dem Projekt hinzugefügt (Tabelle 83, Nr. 4 bis 6).

Im Bereich der nordwestlichen Fläche sind Informationen aus 5 Bohrungen vorhanden. Vier davon beinhalten kein Salz, in einer weiteren Bohrung tritt Salz ab einer Teufe von größer gleich 1500 m auf. Dieses Gebiet erfüllt somit nicht die Mindestanforderungen (Tabelle 83, Nr. 4).

Im zweiten Gebiet an der Grenze zu Brandenburg werden, da keine Bohrungen vorhanden sind, die Teufeninformationen aus dem SPBA (Tabelle 82, Nr. 2 und 3; TNO - Geological Survey of the Netherlands (2010)) in das GIS-Projekt geladen. Da die Oberfläche des Keuper in diesem Gebiet bei größer gleich 2,6 km u. GOK liegt, werden die Mindestanforderungen ebenfalls nicht erfüllt (Tabelle 83, Nr. 5).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

In den Gebieten, die bei der Auswertung der thematischen Karten ermittelt wurden, können Steinsalze als Hauptkomponente vorkommen. Die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ wird in diesen Gebieten daher als **potenziell erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Es ist kein 3D-Modell vorhanden, aus dem Informationen zu der Mächtigkeit der Keuper-Salinare abgeleitet werden können.

Das Vorkommen von Keupersalz in Mecklenburg-Vorpommern kann laut Inventarisierungstabelle (siehe Kapitel 5) größer als 100 m mächtig sein. In Bereichen, in denen laut paläogeographischem Kartenmaterial Keuper-Salinar vorkommen kann, wurde im Bereich Grevesmühlen lediglich in einer der fünf Bohrungen Steinsalz in geringer Mächtigkeit erbohrt. Der Mittlere Keuper besteht dort stattdessen vor allem aus Mergeln, Gips, Anhydrit und Kalksteinen.

Die Mindestanforderungen „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird somit als **nicht erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Wie unter Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ beschrieben, können ohne 3D-Modell und ohne Bohrungen auf den Flächen, in denen Keuper-Salinar vorkommen kann, zunächst keine Aussage zu der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ gemacht werden.

Daher wurden diese Informationen aus dem SPBA entnommen. Der Top des Keuper liegt im verbleibenden Gebiet bei größer als 1500 m u. GOK. Somit wird die Mindestanforderung an die Tiefenlage **nicht erfüllt**.

Zusammenfassende Bewertung

Die Bearbeitung der vorliegenden Daten zur Anwendung der Mindestanforderungen hat für das Keuper-Salinar in Mecklenburg-Vorpommern ergeben, dass die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG im gesamten Landesgebiet **nicht erfüllt** werden.

Daher wird auf eine weitere Bearbeitung und Ausweisung von Gebieten, welche die Mindestanforderungen erfüllen, verzichtet. Damit entfällt die Beurteilung der Mindestanforderungen „Fläche des Endlagers“ und „Erhalt der Barrierewirkung“.

Ergebnis

Die Bearbeitung der vorliegenden Daten zur Anwendung der Mindestanforderungen hat für das Keuper-Salinar in Mecklenburg-Vorpommern ergeben, dass die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG im gesamten Landesgebiet **nicht erfüllt** werden.

Daher wird auf eine weitere Bearbeitung und Ausweisung von Gebieten, welche die Mindestanforderungen erfüllen, verzichtet.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 84 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 84: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum der Datei	Beschreibung
118448 70_01	6815	Keuper_Salinar	Verbreitungsgrenze	Die Verbreitungsgrenze des Keuper-Salinars wurde als Bewertungsgrundlage herangezogen
118427 26	7610	190_k_iso	Tiefenlinien	Der Tiefenlinienplan der Keuperoberfläche wurde zur Eingrenzung der relevanten Bereiche verwendet

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum der Datei	Beschreibung
11888776	9164	LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06	Schichtenverzeichnisse aller entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgeführt	Bohrdatenbank

Darüber hinaus werden folgende thematische Karten als entscheidungserheblich angesehen:

- Beutler, G., Hauschke, N., Nitsch, E. & Vath, U. (2005): *Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper*. Frankfurt am Main: Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg ISBN 978-3-510-61376-2:
 1. Paläogeographische Karte der Grabfeld-Formation (Abb. 3-6 auf S. 25)
 2. Paläogeographische Karte der Weser-Formation (Abb. 3-8 auf S. 27)

Diese Karten wurden mit der Verbreitung des Keuper-Salinars aus dem BASAL-Bericht (Reinhold et al. 2014) kombiniert, um die maximale Verbreitung des Keuper-Salinars zu bestimmen.

Die Mindestanforderungen konnten durch die Auswertung von Schichtenverzeichnissen von Bohrungen und den Teufenangaben des SPBA (TNO - Geological Survey of the Netherlands 2010) angewendet werden. In allen relevanten Bohrungen wurden Steinsalzmächtigkeiten deutlich unter 100 m angetroffen (vgl. Anhang).

1.2.17 Mittlerer Keuper – Niedersachsen, Bremen, Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Niedersachsen, Hamburg und Bremen. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Keuper die Salzformationen der Grabfeld- und Weser-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, Hamburg und Bremen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Mittlerer Keuper, *Grabfeld- und Weser-Formation*

Der Keuper ist eine Gruppe der Trias. Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Es wird zwischen dem Unteren, Mittleren und Oberen Keuper unterschieden. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Niedersachsen, Bremen und Hamburg die Grabfeld- (Unterer Gipskeuper) und die Weser-Formation (Oberer-Gipskeuper) des Mittleren Keuper betrachtet. Zwischen den beiden Formationen tritt die Stuttgart-Formation (Schilfsandstein) auf, die aus terrigenen Sedimenten besteht. Sie setzt sich überwiegend aus Sand-, Ton- und/oder Siltstein zusammen (Bachmann et al. 2008).

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Keuper und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Niedersachsen (Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen der Grabfeld- und Weser-Formation des Mittleren Keuper sind im nördlichen Niedersachsen weit verbreitet. Die Grenze nach Süden verläuft von Westen nach Osten ungefähr wie folgt: Meppen, Leer, Oldenburg, Delmenhorst, nördlich von Nienburg, Soltau, nördlich von Uelzen, nördlich von Goslar; zusätzlich im Großraum Celle.

Geologische Beschreibung

Die Grabfeld-Formation besteht in Niedersachsen aus einer zyklischen Pelit-Evaporit Abfolge aus feinschichtigem Wechsel von Tonsteinen, Dolomitsteinmergeln und Gipsen. Weiter nördlich kommen sulfatärmere Ton-Steinsalz-Fazies mit Knollenanhydrit vor. Die mittlere Mächtigkeit beträgt 100 m bis 200 m (Beutler et al. 2005; Beutler & Tessin 2005). In der Weser-Formation kommen rotbunte und grüne Tongesteine (dolomitische Tonsteine und Tonmergelsteine), meist mit Sulfatknollen und dünnen Dolomitbänken, vor. In mehreren Horizonten kommt es zur Einschaltung von knolligen, teilweise auch geschichteten Sulfatbänken, in Norddeutschland mit erheblicher Mächtigkeit, in der Norddeutschen Senke mit drei Steinsalzlager. Die mittlere Mächtigkeit beträgt hier bis über 200 m (Beutler et al. 2005).

Die Mächtigkeit der Steinsalzlager sind regional starken Schwankungen ausgesetzt. Steinsalzlager A ist in Nordwestdeutschland häufig das mächtigste Steinsalzlager der Grabfeld-Formation. Es besteht zumeist aus geringmächtigen Steinsalzlagen und einer Wechsellagerung mit Tonsteinen und Anhydriten. Die Steinsalzlager B und C der Grabfeld-Formation sind häufig ungegliedert, aber nur geringmächtig ausgebildet. Die Lager D und E können Doppelsalinare bis 70 m Mächtigkeit bilden und sind zumeist durch ein geringmächtiges Tonsteinmittel untergliedert. Die Steinsalzlager F und G der Weser-Formation sind häufig geringmächtig ausgebildet und weisen viele anhydritische Einschaltungen auf. Das Steinsalzlager H hingegen kann Mächtigkeiten von mehreren Hundert Metern erreichen, wobei auch hier starke Schwankungen in den Mächtigkeiten zu erwarten sind. Es ist gekennzeichnet durch nur wenige tonige und anhydritische Lagen. Ein weiteres Merkmal des Lagers H ist die durch halokinetische Prozesse begründeten Ansammlungen des Steinsalzes in Salzkissenform (Reinhold et al. 2014).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 85). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 85: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	NI	LBEG	11842295/7775	ts	BGE-GTA3D	3D-Modell (Bombien et al. 2012)
2	NI	LBEG	11881514/9105	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300 m 1. Teil + 2. Teil	Bohrdatenbank
3	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
4	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
5	DE	BGR	11844870_01/6819	shp	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Verbreitung Salzkissen (von Goerne et al. 2016)
6	DE	BGR	11844870_01/6815	mpk	Keuper_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 85 genannten Eingangsdaten wurden folgende thematische Karten verwendet:

Beutler, G., Hauschke, N., Nitsch, E. & Vath, U. (2005): *Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper*. Frankfurt am Main: Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg ISBN 978-3-510-61376-2:

1. Paläogeographische Karte der Grabfeld-Formation (Abb. 3-6 auf S. 25)
2. Paläogeographische Karte der Weser-Formation (Abb. 3-8 auf S. 27)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Keuper in Niedersachsen geprüft wurde, ist in Tabelle 86 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 86: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Keuper aus der Basisfläche Keuper (aus allen Kacheln)	b_Keuper_NI.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, löschen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Keuper_NI_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Keuper_NI_MACRORESULT_qs.ts
h) Export als DXF und Custom ASCII	MG_s_k_NI.dxf MG_s_k_NI.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Zusammenfügen von WG_Salz_stratiform_Keuper_Grabfeld_Fm mit WG_Salz_stratiform_Keuper_Weser_Fm	WG_Salz_stratiform_Keuper_gesamt
b) Das Vorkommen von Keupersalz aus Beutler WG_Salz_stratiform_Keuper_gesamt wird zu dem Keupersalzvorkommen aus BASAL Keuper_Salinar_BASAL gefügt	WG_Salz_stratiform_Keuper_Beutler_2005_und_Reinhold_et_al_2014
c) Filtern der Bohrungen nach Stratigraphie und Petrographie und Anwendung der Mindestanforderungen	NI_Keuper_final

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Layer mit Attribut Salzkissen aus Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly Salzkissen
e) Verschneiden von Salzstrukturen_Inspee__v1_poly Salzkissen mit WG_Salz_stratiform_Keuper_Beutler_2005_und_Reinhold_et_al_2014	Beutlergesamt_InspeeKissen_2D
f) k_basis_MA.DXF wurde in eine 2D-Fläche überführt	k_basis_2D_toppolygon_dissolve
g) k_basis_2D_toppolygon_dissolve wird mit dem Ergebnis aus e (Beutlergesamt_InspeeKissen_2D) verschnitten	Beutlergesamt_InspeeKissen_2D
h) Anwendung der Mindestanforderung „Flächenbedarf“	Beutlergesamt_InspeeKissen_2D_gr3km2
i) Ausschluss von Flächen anhand von Bohrungen	Beutlergesamt_InspeeKissen_2D_gr3km2_Bohrungen
j) Einladen der Punktdaten mit Teufen und Mächtigkeitinformationen	k_basis_MA_XYTableToPoint
k) Überschneiden der Daten aus i und j	XY_NI_gesamt
l) Abgleich der 12-Seemeilen-Zone anhand VG250_STA	

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 86 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D; (Bombien et al. 2012) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell ist die digitale Umsetzung des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = Digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tpl = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän

- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg ab, sowie weite Teile von Niedersachsen bis auf den südlichen Bereich ab Höhe Göttingen. Die Flächen des GTA3D sind in 42 Kacheln untergliedert.

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 86 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen Kachel-weise vor, daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Keuper-Basisflächen (13_k) erzeugt (Tabelle 86, Nr. 2b). Allerdings sind an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermaschung) offenkundig.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 86, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 86, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 86, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Keuper und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen zwischen Lias und Mittelmiozän bis Pliozän sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 86, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten

wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 86, Nr. 2f).

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ m u GOK überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert (Tabelle 86, Nr. 2g). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, wurden gelöscht.

Die Bearbeitungsfläche Keuper wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 86, Nr. 2h).

2D-Bearbeitung

Die Salzformationen im Mittleren Keuper umfassen nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell des geologischen Untergrundes des Landes Niedersachsen. Durch die Verwendung thematischer Karten, Bohrungsinformationen und weiteren geologischen Informationen, können Gebiete über die Auswertung des 3D-Modells hinaus spezifischer ausgewiesen werden, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Zunächst wurde ein GIS-Projekt erstellt (*3_Keuper_NI*). Die in Kapitel „Eingangsdaten“ aufgeführten Karten und Studien wurden eingeladen, vektorisiert und nutzbar gemacht (Tabelle 86, Nr. 1). Die Arbeitsschritte, die in GIS erfolgen, sind in Tabelle 86 ab Nr. 3 aufgeführt.

Um Gebiete auszuweisen, in denen Keuper-Salinar vorkommt, wurden zuerst die Salinar-Verbreitungen aus den Karten von Beutler et al. (2005) vereinigt und diese im Anschluss mit der Verbreitung des Keuper-Salinars aus BASAL (Reinhold et al. 2014) zusammengefügt (Tabelle 86, Nr. 3a & b).

Die Bohrungen (Tabelle 85, Nr. 2) wurden zunächst nach den Attributen Stratigraphie „Keuper“ und Petrographie „Salz“ gefiltert. Im Anschluss wurden die Mindestanforderungen „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ und „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ angewendet und die Bohrungen entsprechend gefiltert.

Übrig blieben neun Bohrungen. Davon liegt eine südlich nahe der Elbemündung und sieben westlich der Wesermündung in die Nordsee. Die sieben Bohrungen westlich der Weser durchteufen einen Salzstock und werden bei der weiteren Betrachtung nicht mehr berücksichtigt (Tabelle 86, Nr. 3c).

Um Gebiete zu identifizieren, in denen die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ unabhängig von Bohrungsinformationen erfüllt sein kann, wurde das gemeinsame Vorkommen von Keuper-Salinar mit Salzkissen verschnitten. Hierfür wurde ein Layer mit dem Attribut „Salzkissen“ aus dem InSpEE-Projekt (von

Goerne et al. 2016) erstellt. Der entstandene Layer wurde anschließend mit dem ermittelten Vorkommen von Keuper-Salinaren verschnitten (Tabelle 86, Nr. 3d und e).

Die Flächen aus dem 3D-Modell wurden zur weiteren Bearbeitung in 2D-Flächen überführt und anschließend mit dem Ergebnis des Vorkommens von Salzkissen und Keuper-salinär in Niedersachsen verschnitten (Tabelle 86, Nr. 3f und g).

Außerhalb des 3D-Modells, das den südlichen Teil von Niedersachsen nicht mit abdeckt, gibt es keine Hinweise auf Keuper-Salinär durch Bohrungen, paläogeographische Karten von Beutler et al. (2005) oder der Karte der Verbreitung von Keuper-Salinär aus dem BASAL-Projekt (Reinhold et al. 2014).

Die entstandenen Flächen wurden im Anschluss auf die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“, die für Steinsalz bei größer gleich 3 km² liegt, überprüft (Tabelle 13, Nr. 3h). Einige Strukturen konnten anhand von Bohrungen ausgeschlossen oder bestätigt werden (vgl. Anhang):

Nordöstlich von Sittensen im Salzkissen Kullmoor wurde der Mittlere Keuper in zwei Bohrungen erbohrt:

1. mit 28,9 m
2. ein Teil der Weser-Formation (Rote Wand), die kein Steinsalz enthält (vgl. Beutler et al. 2005), mit 93 m Mächtigkeit.

In dem Teil des Salzkissens Ostenholz, in dem Keupersalinare vorkommen, zeigen zwei Bohrungen, dass die Weser-Formation zu geringmächtig ist. Diese beiden Flächen wurden somit ausgeschlossen, da die verbleibende Fläche eine zu geringe Ausdehnung hätte.

Das Salzkissen unter der Stadt Lüneburg wurde mit einer Bohrung erbohrt. Die Fläche des Salzkissens, in dem auch Keupersalinär vorkommen kann, beträgt 3,7 km². Da die Bohrung mittig in diesem Bereich liegt und lediglich 6 m Keuper enthält, wird die mögliche Fläche zu klein, um die Mindestanforderung an den Flächenbedarf erfüllen zu können (Tabelle 86, Nr. 3i).

In der Fläche MG_s_k_NI_9 (Tabelle 87) werden die Mindestanforderungen an die Teufe, die Mächtigkeit und die Petrographie durch eine Bohrung bestätigt (Krummendeich 1; vgl. Anhang)

Da die Informationen aus dem 3D-Modell zur bisherigen Bearbeitung keine z-Werte mehr enthalten, werden die Mächtigkeitsinformationen und die Tiefenlage der Keuper-Basis in Form von Punktdaten (ASCII) in die GIS-Datei geladen und mit den verbliebenen Flächen verschnitten (Tabelle 86, 3 j und k). Die Mindestanforderungen zur Tiefenlage werden stets erfüllt.

Es wurde abgeglichen, ob die Flächen des stratiformen Keuper-Salinars in der Nordsee innerhalb der 12-Seemeilen-Zone liegen (Tabelle 85, Nr. 10; Tabelle 86, 3l).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die lithostratigraphische Einheit Mittlerer Keuper weist gemäß der Inventarisierungstabelle für Niedersachsen (siehe Kapitel 5) in der Weser- und Grabfeld-Formation Steinsalze auf. Die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ wird daher für die verbleibenden Gebiete als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Die Mächtigkeit des Keuper wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden herausgenommen.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Keuper zusammen. Flächen, bei denen Bohrungen das Vorkommen von ausreichend mächtigen Keuper-Salinar widerlegen, wurden aussortiert.

Die verbleibenden Gebiete **erfüllen** die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ von mehr als 100 m.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Die Tiefenlage des Keuper wurde anhand des 3D-Modells des geologischen Untergrundes unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Flächen, bei denen Bohrungen das Vorkommen von ausreichend mächtigen Keuper-Salinar in diesem Teufenbereich widerlegen, wurden aussortiert. Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher für die verbleibenden Gebiete als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die

diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 46 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Keuper in Niedersachsen, Hamburg und Bremen dargestellt.

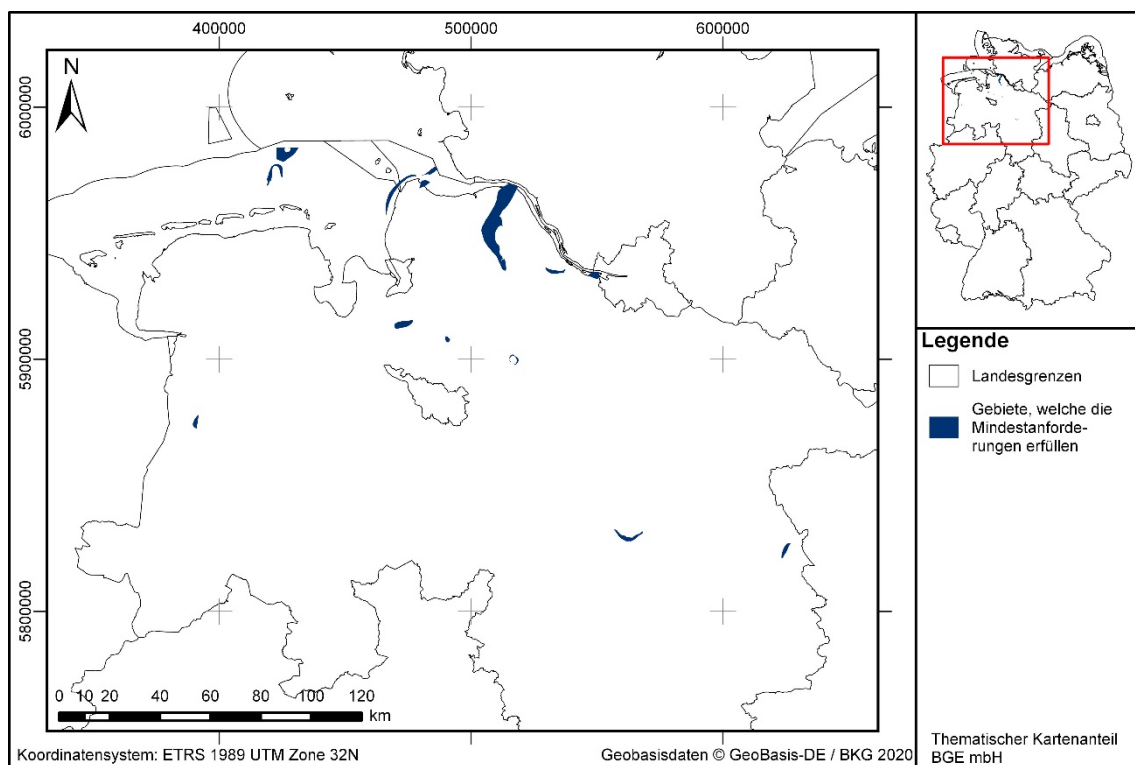


Abbildung 46: *Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für den Mittleren Keuper in Niedersachsen, Bremen und Hamburg*

Eine Auflistung der Gebiete in Niedersachsen, Hamburg und Bremen, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 87 zu finden.

Tabelle 87: Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, Hamburg und Bremen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_k_NI_1	15
MG_s_k_NI_2	8
MG_s_k_NI_3	7
MG_s_k_NI_4	4
MG_s_k_NI_5	3
MG_s_k_NI_6	16
MG_s_k_NI_7	8
MG_s_k_NI_8	9
MG_s_k_NI_9	162
MG_s_k_NI_10	8
MG_s_k_NI_11	23
MG_s_k_NI_12	7
MG_s_k_NI_13	16
MG_s_k_NI_14	31

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 88 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 88: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11844870_01	6815	Keuper_Salinaren	Verbreitungsgrenze	Die Verbreitungsgrenzen wurden als Bewertungsgrundlage herangezogen
11842295	7775	BGE-GTA3D		Verwendetes 3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)

DokID	Grup- pen-ID	Name des Da- tensatzes	Entscheidungserhebli- ches Datum aus der Da- tei	Beschreibung
1184487 0_01	6819	Salzstrukt- ren_Inspee__ v1_poly	Salzkissen	Die Verbreitung der Salzkissen wurde zur Eingrenzung verwendet (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016; von Goerne et al. 2016)
1188151 4	9105	BDNGeodin- Export Nieder- sachsen tiefer 300m 1. Teil, 2. Teil	Die Schichtenverzeich- nisse der entscheidungs- erheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgelistet	Bohrdatenbank

Darüber hinaus werden folgende thematische Karten als entscheidungserheblich eingestuft:

Beutler, G., Hauschke, N., Nitsch, E. & Vath, U. (2005): *Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper*. Frankfurt am Main: Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg ISBN 978-3-510-61376-2:

1. Paläogeographische Karte der Weser-Formation (Abb. 3-8 auf S. 27)
2. Paläogeographische Karte der Grabfeld-Formation (Abb. 3-6 auf S. 25)

Die Grenzziehung zu den Mindestanforderungen „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ wurde durch das 3D-Modell erarbeitet. Eine Eingrenzung bzgl. der Verbreitung des Keuper-Salinars in Niedersachsen wurde neben den Daten des 3D-Modells und der thematischen Karte des Keuper-Salinars aus dem BASAL-Bericht (siehe Tabelle 88) auch aus der Verbreitung der Grabfeld- und Weser-Formation generiert.

Da wenige Bohrungen die Erfüllung der Mindestanforderungen nachweisen und diese bis auf eine Bohrung zu einer steil stehenden Salzstruktur bei Nordenham gehören (vgl. Anhang), wurde die Verbreitung von Salzkissen aus dem InSpEE Projekt (von Goerne et al. 2016) verwendet, um mögliche nicht erbohrte Keuper-Salinare in ausreichender Mächtigkeit auszuweisen.

1.2.18 Mittlerer Keuper – Sachsen-Anhalt

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Sachsen-Anhalt. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Keuper die Salzformationen der Grabfeld- und Weser-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Sachsen-Anhalt, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Mittlerer Keuper, *Grabfeld- und Weser-Formation*

Der Keuper ist eine Gruppe der Trias. Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Es wird zwischen dem Unteren, Mittleren und Oberen Keuper unterschieden. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Sachsen-Anhalt die Grabfeld- (Unterer Gipskeuper) und die Weser-Formation (Oberer-Gipskeuper) des Mittleren Keuper betrachtet. Zwischen den beiden Formationen tritt die Stuttgart-Formation (Schilfsandstein) auf, die aus terrigenen Sedimenten besteht. Sie setzt sich überwiegend aus Sand-, Ton und/oder Siltstein zusammen (Bachmann et al. 2008).

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Keuper und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Sachsen-Anhalt (siehe Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen der Grabfeld- und Weser-Formation des Mittleren Keuper sind in Sachsen-Anhalt in der Subherzynyen-Mulde, dem SE-Harzvorland, der Calvörde-Scholle

und in der Altmark verbreitet, speziell an der Grenze zu Niedersachsen im Bereich Barneberg, westlich von Salzwedel und im Bereich Arendsee; an der Grenze zu Brandenburg im Bereich Großdemsin und Schoppsdorf.

Geologische Beschreibung

Die Grabfeld-Formation startet in Sachsen-Anhalt an der Basis mit den Grundgipsschichten (dolomitische Tonsteine mit Sulfatknollen und -horizonten), überlagert von den Unteren Hauptgipsschichten (Tonsteine mit zahlreichen Sulfatknollen und -bänken (10-30%) und Dolomitbänke). Darauf folgen die Oberen Hauptgipsschichten (Tonsteine mit Sulfat- und Dolomitlagen). Darin eingelagert sind die Steinsalz-Lager D und E, die lokal bis 80 m mächtig werden (Bachmann et al. 2008).

Die Weser-Formation startet in Sachsen-Anhalt an der Basis mit der Roten Wand (rotbraune massige Tonsiltsteine mit Sulfatknollen in einigen Lagen). Diese Schicht wird überlagert von den Lehrberg-Schichten (Tonmergelsteine mit 1 – 3 Dolomitbänken), dem Schwellenburg-Mergel (rotbunte, sulfatführende Tonsteine) sowie dem Heldburg-Gipsmergel (Gipsknollenhorizonte und Sulfatlagen). Eingelagert sind die Steinsalz-Lager F bis H mit einer Mächtigkeit von bis zu 50 m (Bachmann et al. 2008).

Die Mächtigkeit der Steinsalzlager sind regional starken Schwankungen ausgesetzt. Steinsalzlager A ist in Nordwestdeutschland häufig das mächtigste Steinsalzlager der Grabfeld-Formation. Es besteht zumeist aus geringmächtigen Steinsalzlagen und einer Wechsellagerung mit Tonsteinen und Anhydriten. Die Steinsalzlager B und C der Grabfeld-Formation sind häufig ungegliedert, aber nur geringmächtig ausgebildet. Die Lager D und E können Doppelsalinare bis 70 m Mächtigkeit bilden und sind zumeist durch ein geringmächtiges Tonsteinmittel untergliedert. Die Steinsalzlager F und G der Weser-Formation sind häufig geringmächtig ausgebildet und weisen viele anhydritische Einschaltungen auf. Das Steinsalzlager H hingegen kann Mächtigkeiten von mehreren Hundert Metern erreichen, wobei auch hier starke Schwankungen in den Mächtigkeiten zu erwarten sind. Es ist gekennzeichnet durch nur wenige tonige und anhydritische Lagen. Ein weiteres Merkmal des Lagers H ist die durch halokinetische Prozesse begründeten Ansammlungen des Steinsalzes in Salzkissenform (Reinhold et al. 2014).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 89). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 89: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BGR	11844870_01/6815	mpk	Keuper_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
2	DE	BGR	11844870_01/6819	shp	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Verbreitung Salzkissen (von Goerne et al. 2016)
3	DE	BGR	11842726/7610	shp	190_k_iso	Tiefenlinienplan <i>Top Keuper</i> aus SPBA (TNO - Geological Survey of the Netherlands 2010)
4	DE	BGR	11842726/7612	shp	200_so_iso	Tiefenlinienplan <i>Top Oberer Buntsandstein</i> aus SPBA (TNO - Geological Survey of the Netherlands 2010)
5	ST	LAGB	11884687/8927	txt	Bohrungen mit einer Teufe ueber 300 m	Bohrungsdaten

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 89 genannten Eingangsdaten wurden folgende thematische Karten verwendet:

- Beutler, G., Hauschke, N., Nitsch, E. & Vath, U. (2005): *Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper*. Frankfurt am Main: Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg ISBN 978-3-510-61376-2:
 1. Paläogeographische Karte der Grabfeld-Formation (Abb. 3-6 auf S. 25)
 2. Paläogeographische Karte der Weser-Formation (Abb. 3-8 auf S. 27)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Keuper in Sachsen-Anhalt geprüft wurde, ist in Tabelle 90 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 90: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Erstellen eines GIS-Projektes; einladen der in Tabelle 89 genannten Daten, ggf. vektorisieren	
2. Zusammenfügen von Beutler Weser FM und Beutler Grabfeld FM	WG_Salz_stratiform_Keuper_gesamt (Beutler 2005)
3. Das Vorkommen von Keupersalz aus Beutler WG_Salz_stratiform_Keuper_gesamt wird zu dem Keupersalzvorkommen aus BASAL Keuper_Salinar_BASAL gefügt	WG_Salz_stratiform_Keuper_Beutler_2005_und_Reinhold_et_al_2014
4. Layer erstellen aus allen Polygonen mit Attribut „Salzkissen“ aus Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly Salzkissen
5. WG_Salz_stratiform_Keuper_gesamt wird mit den Salzkissen aus Salzstrukturen_Inspee__v1_poly Salzkissen überschritten	InspeeSalzkissen_Beutlergesamt
6. Auswahl der Flächen in Sachsen-Anhalt und Prüfung Flächenbedarf von 3 km ²	InspeeSalzkissen_Beutlergesamt_ST
7. Auswertung der Bohrungen nach Stratigraphie und Mindestanforderung	Keine Bohrung zeigt Steinsalz, welches die Mindestanforderungen erfüllen kann
8. Überschneiden von ST_k_final mit 190_k_iso und anschließend mit 200__so_iso	TopKeuper_ST_final und TopBuntsandstein_ST_final
9. Anwendung der Mindestanforderung Mächtigkeit und Teufenlage	ST_k_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Da für das zu bearbeitende Gebiet kein 3D-Modell vorliegt, wird das Vorkommen von Salzformationen ausschließlich mittels thematischen Karten und Bohrungsdaten spezifiziert.

2D-Bearbeitung

Alle verwendeten Informationen sind in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengefasst. Die einzelnen Schritte sind der Tabelle 90 zu entnehmen.

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (*3_Keuper_ST*) und die in Kapitel „Eingangsdaten“ aufgeführten Karten und Studien nutzbar gemacht, ggf. vektorisiert und eingeladen (Tabelle 90, Nr. 1). Die Karten wurden in mehreren Schritten miteinander verschnitten (Tabelle 90, Nr. 2-5):

Um Gebiete auszuweisen, in denen Keuper-Salinar vorkommen kann, wurden die paläogeographischen Karten der Grabfeld- und Weser-Formation aus Beutler et al. (2005) verschnitten und anschließend mit den Karten des Keuper-Salinars aus BASAL (Reinhold et al. 2014) zusammengefügt.

Laut Literatur (vgl. Geologischer Überblick) wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ vom Keuper-Salinar in Sachsen-Anhalt überwiegend nicht erfüllt und kann höchstens in Salzkissen erreicht werden. Daher wurde ein Layer mit dem Attribut „Salzkissen“ aus dem InSpEE-Projekt (von Goerne et al. 2016) erstellt und mit dem Vorkommen von Keuper-Salinaren verschnitten (Tabelle 90, Nr. 5)

Diese Flächen wurden nach der Mindestanforderung des Flächenbedarfs von größer gleich 3 km² gefiltert (Tabelle 90, Nr. 6).

Anschließend wurde die Bohrdatenbank (vgl. Tabelle 89) auf die Erfüllung der Mindestanforderungen geprüft. Keine der Bohrungen in Sachsen-Anhalt mit Schichtenverzeichnis enthält mindestens 100 m Keuper-Salinar in einer Teufe von 300 m – 1500 m (Tabelle 90, Nr. 7).

Die gesamten Bohrungen wurden zu dem GIS-Projekt hinzugefügt, um diese mit den Flächen aus den bisher erzeugten Flächen abzugleichen und diese somit eventuell auszuschließen.

Die Bohrungen treffen die Flächen, die sich aus den Schritten 1 - 5 ergeben haben, nicht. Um Informationen über die Teufe und Mächtigkeit zu erhalten, wurden die Flächen mit den Daten des SPBA (vgl. Tabelle 89) verschnitten, in denen man Informationen zu Tiefenlage des Top Keuper und Top Buntsandstein erhält (Tabelle 90, Nr. 8). Somit können je eine Fläche westlich von Salzwedel und westlich von Genthin aufgrund der Teufenlage der Topfläche des Keuper größer als 1500 m ausgeschlossen werden. Der Abstand zwischen den Topflächen von Keuper und Buntsandstein beträgt stets größer gleich 100 m, so dass keine Fläche aufgrund der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ ausgeschlossen werden kann.

Somit ergeben sich vier Flächen, bei denen die Mindestanforderungen zutreffen können (Tabelle 90, Nr. 9), der Nachweis aber nicht erbracht wurde. Die Datenlage ist aufgrund der Verteilung der Bohrdaten und des fehlenden 3D-Modells unzureichend.

Bei der Inventarisierung wurde das Keuper-Salinar in Brandenburg ausgeschlossen. Die beiden Flächen, die in Sachsen-Anhalt und in Brandenburg liegen und bei denen auch in Sachsen-Anhalt kein Nachweis des Erfüllens der Mindestanforderungen erbracht wurde, werden nicht als Mindestanforderungsgebiet ausgewiesen.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Die Erfüllung der Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ wird bei Steinsalz als gegeben eingeschätzt. Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner

gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Da in den Salzkissenbereichen des Keuper-Salinars mächtige Steinsalze vorkommen, wird für die ausgewiesenen Gebiete die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **erfüllt** eingestuft.

*Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG*

Es ist kein 3D-Modell vorhanden, aus dem Informationen zu der Mächtigkeit der Keuper-Salinare abgeleitet werden können. Das Vorkommen von Keuper-Salinar in Sachsen-Anhalt ist laut Inventarisierungstabelle (siehe Kapitel 5) weniger als 100 m mächtig. Höhere Mächtigkeiten können nur in Salzkissen erreicht werden, die bisher nicht berücksichtigt wurden. Das Vorkommen von Keuper-Salinaren wurde mit den ausgewiesenen Salzkissen in Sachsen-Anhalt aus dem Projekt InSpEE (von Goerne et al. 2016) verschritten.

Die Auswertung der Bohrungen ergab keine Mächtigkeit größer gleich 100 m des Keuper-Salinars. Da keine Bohrung in den Gebieten liegt, wo Keuper-Salinar und Salzkissen gemeinsam vorkommen, konnten auf diesem Weg keine zusätzlichen Informationen generiert werden. Daher wurden diese Informationen aus dem SPBA (TNO - Geological Survey of the Netherlands 2010) entnommen und die Mächtigkeit zwischen „Top Keuper“ und „Top Buntsandstein“ größer gleich 100 m ermittelt. Flächen mit einer geringeren Mächtigkeit waren nicht vorhanden.

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher für die verbleibenden Gebiete als **potenziell erfüllt** eingestuft.

*Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG*

Wie unter Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ beschrieben, können ohne 3D-Modell und ohne Bohrungen auf den ausgewiesenen Flächen keine Aussage zu der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ gemacht werden. Daher wurden diese Informationen aus dem SPBA (TNO - Geological Survey of the Netherlands 2010) entnommen. Flächen, bei denen das Top Keuper nicht zwischen 300 m und 1500 m u GOK liegt, werden nicht mehr berücksichtigt.

Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher für die verbleibenden Gebiete als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird daher die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 47 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Keuper in Sachsen-Anhalt dargestellt.

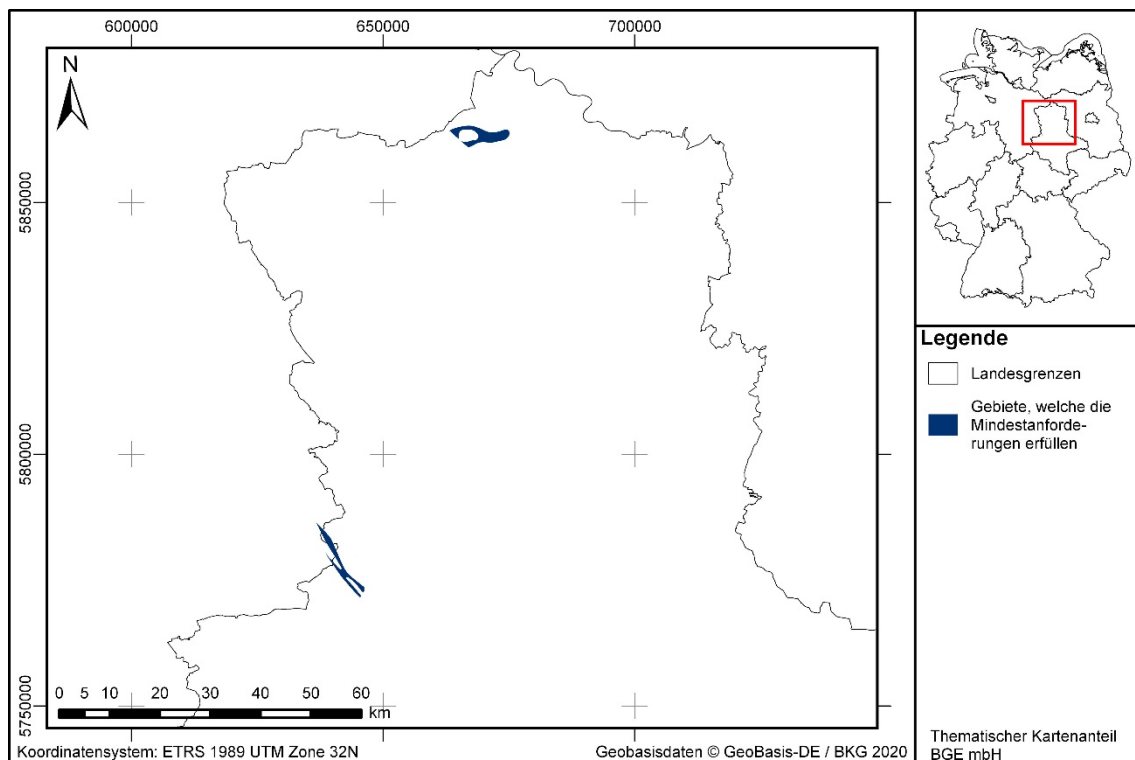


Abbildung 47: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung des Mittleren Keuper in Sachsen-Anhalt. Eine Auflistung der Gebiete in Sachsen-Anhalt, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 91 zu finden.

Tabelle 91: Auflistung aller Gebiete in Sachsen-Anhalt, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_k_ST_3	21
MG_s_k_NI_ST_4	17

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 92 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 92: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
118448 70_01	6815	Keuper_Salinar_BASAL	Verbreitungsgrenze	Die Verbreitungsgrenze des Keuper-Salinars wurde als Bewertungsgrundlage zur Eingrenzung herangezogen
118448 70_01	6819	Salzstrukturen_Inspeev1_poly	Salzkissen	Die Umriss der Salzkissen wurde zur Eingrenzung verwendet.
118427 26	7610	190_k_iso	Tiefenlinien	Die Tiefenlinien bestätigen die Erfüllung der Mindestanforderungen „minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ und „Mächtigkeit“
118427 26	7612	200_so_iso	Tiefenlinien	Die Tiefenlinien bestätigen die Erfüllung der Mindestanforderungen „minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ und „Mächtigkeit“

Darüber hinaus werden folgende veröffentlichte paläogeographische Karten als entscheidungserheblich eingestuft:

1. Paläogeographische Karte der Grabfeld-Formation (Abb. 3-6 auf S. 25) (Beutler et al. 2005)
2. Paläogeographische Karte der Weser-Formation (Abb. 3-8 auf S. 27) (Beutler et al. 2005)

Die eingetragene Steinsalzverbreitung wurde an einigen Stellen zur Eingrenzung verwendet.

1.2.19 Mittlerer Keuper – Schleswig-Holstein

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Schleswig-Holstein. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Keuper die Salzformationen der Grabfeld- und Weser-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Schleswig-Holstein, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Mittlerer Keuper, *Grabfeld- und Weser-Formation*

Der Keuper ist eine Gruppe der Trias. Die Trias kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper untergliedert werden. Es wird zwischen dem Unteren, Mittleren und Oberen Keuper unterschieden. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) werden in Schleswig-Holstein die Grabfeld- (Unterer Gipskeuper) und die Weser-Formation (Oberer-Gipskeuper) des Mittleren Keuper betrachtet. Zwischen den beiden Formationen tritt die Stuttgart-Formation (Schilfsandstein) auf, die aus terrigenen Sedimenten besteht. Sie setzt sich überwiegend aus Sand-, Ton- und/oder Siltstein zusammen (Bachmann et al. 2008).

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphische Einheit des Keuper und deren lithologischer Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Schleswig-Holstein (Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen der Grabfeld- und Weser-Formation des Mittleren Keuper sind in Schleswig-Holstein weit verbreitet, außer im Nordwesten und Südosten des Landes.

Geologische Beschreibung

Die Grabfeld-Formation in Schleswig-Holstein besteht aus einer zyklischen Pelit-Evaporit Abfolge von Tonsteinen, Dolomitsteinmergeln und Gipsen. Im nördlichen Bereich kommen sulfatärmere Ton-Steinsalz-Fazies mit Knollenanhydrit vor. Die Steinsalzlager sind unterschiedlich ausgebildet. Steinsalzlager A enthält geringmächtige Steinsalzhorizonte in Wechsellagerung mit Ton und Sulfat. Bei Steinsalzlager B handelt es sich um ein kompaktes, ungegliedertes Steinsalzlager. Steinsalzlager C ist geringmächtig, bis 10 m und ungegliedert, wohingegen Steinsalzlager D & E als Doppelsalinare bis 70 m Mächtigkeit, die durch Tonmittel gegliedert sind, auftreten (Beutler et al. 2005).

In der Weser-Formation kommen drei weitere Steinsalzlager mit unterschiedlicher Mächtigkeit vor. Steinsalzlager F ist kompakt und schwach gegliedert ausgebildet mit einer Mächtigkeit von 30-40 m, Steinsalzlager G ist geringmächtig und Steinsalzlager H kann eine Mächtigkeit von mehreren 100 m erreichen, wobei auch hier starke Schwankungen in den Mächtigkeiten zu erwarten sind. Es ist gekennzeichnet durch nur wenige tonige und anhydritische Lagen. Ein weiteres Merkmal des Lagers H ist die durch halokinetische Prozesse begründeten Ansammlungen des Steinsalzes in Salzkissenform (Reinhold et al. 2014).

Daneben sind rotbunte und grüne Tongesteine (dolomitische Tonsteine und Tonmergesteine), meist mit Sulfatknollen, und dünnen Dolomitbänken ausgebildet. In mehreren Horizonten kommen Einschaltungen von knolligen, teilweise auch geschichteten Sulfatbänken, mit erheblicher Mächtigkeit in Norddeutschland vor.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 93). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 93: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	SH	LLUR	11874951/7 723	pl/ts	Strukturmodell- StörTief	3D-Modell (Thomsen et al. 2017)
2	DE	BKG	11875056/7 728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen

Nr.	Bun- des- land	Be- hörde	DokID/ Dateigruppe	Datenfor- mat	Dateiname	Bemerkungen
3	DE	BKG	11865482/8 853	ASCII	DGM200	Digitales Geländemo- dell
4	DE	BGR	11844870_0 1/6815	mpk	Keuper_Salinar	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)
5	DE	BGR	11844870_0 1/6819	shp	Salzstrukt- ren_Inspee__v1_poly	Verbreitung Salzkis- sen (von Goerne et al. 2016)
6	SH	LLUR	11873390/7 714	mdb	Archiv_LLURgr30	Bohrdatenbank
7	SH	LLUR	11873390/7 713	mdb	KW_Daten	Bohrdatenbank
8	DE	BGR	11842726/7 610	shp	190_k_iso	Tiefenlinienplan <i>Top Keuper</i> aus SPBA (TNO - Geological Survey of the Netherlands 2010)

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 93 genannten Eingangsdaten wurden folgende thematische Karten verwendet:

- Beutler, G., Hauschke, N., Nitsch, E. & Vath, U. (2005): *Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper*. Frankfurt am Main: Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg ISBN 978-3-510-61376-2:
 1. Paläogeographische Karte der Grabfeld-Formation (Abb. 3-6 auf S. 25)
 2. Paläogeographische Karte der Weser-Formation (Abb. 3-8 auf S. 27)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Keuper in Schleswig-Holstein geprüft wurde, ist in Tabelle 94 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 94: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Keuper aus der Basisfläche Keuper	b_Keuper_SH.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Keuper_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Keuper_MACRORESULT_qs.ts
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_k_SH.dxf MG_s_k_SH.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) MG_s_k_SH wurde in eine 2D-Fläche überführt	6_K_basis_final_2D
b) Zusammenfügen von WG_Salz_stratiform_Keuper_Grabfeld_Fm mit WG_Salz_stratiform_Keuper_Weser_Fm	WG_Salz_stratiform_Keuper_gesamt (Beutler 2005)

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Das Vorkommen von Keupersalz aus Beutler WG_Salz_stratiform_Keuper_gesamt wird zu dem Keupersalzvorkommen aus BASAL Keuper_Salinar gefügt	WG_Salz_stratiform_Keuper_Beutler_2005_und_Reinhold_et_al_2014
d) Layer mit Attribut Salzkissen aus Salzstrukturen_Inspee__v1_poly	Salzstrukturen_Inspee__v1_poly Salzkissen
e) Verschneiden von WG_Salz_stratiform_Keuper_Beutler_2005_und_Reinhold_et_al_2014 mit Salzstrukturen_Inspee__v1_poly Salzkissen und 6_K_basis_final_2D	Keuper_Salinar_Beutler_Reinhold_Modell_Salzkissen
f) Prüfung auf Mindestfläche größer gleich 3 km ²	Keuper_Salinar_Beutler_Reinhold_Modell_Salzkissen_Flaeche
g) verschneiden von Keuper_Salinar_Beutler_Reinhold_Modell_Salzkissen_Flaeche mit 190_k_iso	Top_Keuper
h) verschneiden mit relevante_Bohrungen	Bohrungen_Flaeche

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 94 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das StörTief-Modell ist ein geologisches 3D-Modell des Geologischen Dienstes Schleswig-Holstein (des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume LLUR) aus dem Jahr 2017 (Thomsen et al. 2017). Zur Bearbeitung des Modells wurden Daten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland (Baldschuhn et al. 2001) und zusätzlich bekannte Tiefbohrungen verwendet. Modellierte Störungsflächen bilden hauptsächlich tiefreichende Störungssysteme ab. Scheitelstörungen über Salzstrukturen wurden nicht modelliert. Das Modell deckte die komplette Landfläche des Bundeslandes Schleswig-Holstein ab, reicht auch in die Gebiete der Ost- und Nordsee. Die 12-Seemeilen-Zone ist jedoch nicht in Gänze Teil des Modellumfangs, ebenso wenig wie Helgoland. Folgende Flächen wurden hauptsächlich als Basisflächen modelliert:

- StM_00_Topographie: Geländeoberfläche
- StM_01_Basis_TpaO: Oberes Paläozän
- StM_02_Basis_KrO: Obere Kreide
- StM_03_Basis_KrU: Untere Kreide
- StM_04_Basis_JO: Oberer Jura
- StM_05_Basis_JM: Mittlerer Jura

- StM_06_Basis_JU: Unterer Jura
- StM_07_Basis_KO: Oberer Keuper
- StM_08_Basis_K: Keuper
- StM_09_Basis_SO: Oberer Buntsandstein
- StM_10_Basis_SM: Mittlerer Buntsandstein
- StM_11_Basis_SU: Unterer Buntsandstein
- StM_12_Basis_Z: Zechstein
- StM_Salzdiapire: Hüllflächen der Salzstrukturen
- StM_Stoerungen: Störungsfächen

Das StörTief-Modell wurde dem Basismodell SH vorgezogen, da in den Nord- und Ostseebereichen keine Keupersalinare erwarten werden. Das StörTief-Modell beinhaltet als Topfläche des Keuper die Grenzfläche zum Oberen Keuper und nicht wie das Basismodell die Grenzfläche zum Unteren Jura. Da die Keupersalinare im Unteren bzw. Mittleren Keuper auftreten, kann das StörTief-Modell dieses stratigraphische Paket genauer darstellen.

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 94 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Aus der Basisfläche Keuper des StörTief-Modells wurde die Bearbeitungsfläche Keuper generiert (Tabelle 94, Nr. 2b).

Das Digitale Geländemodell für Schleswig-Holstein wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 94, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 94, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 94, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Keuper und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Oberen Keuper sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 94, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 94, Nr. 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300-1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 94, Nr. 2g). Des Weiteren

wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profileschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagererelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Keuper wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 94, Nr. 2h).

2D-Bearbeitung

Die Salzformationen im Mittleren Keuper umfassen nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im 3D-Modell des geologischen Untergrundes des Landes Schleswig-Holstein. Durch die Verwendung thematischer Karten, Bohrungsinformationen und weiteren geologischen Informationen, können Gebiete über die Auswertung des 3D-Modells hinaus spezifischer ausgewiesen werden, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Zunächst wurde ein GIS-Projekt erstellt. Die Arbeitsschritte, die in GIS erfolgten, sind in Tabelle 94 ab Nr. 3 aufgeführt. Die im Kapitel „Eingangsdaten“ aufgeführten Karten und Studien wurden eingeladen, vektorisiert und nutzbar gemacht.

Die Flächen aus dem 3D-Modell wurden zur weiteren Bearbeitung in 2D-Flächen überführt (Tabelle 94, Nr. 3a).

Um Gebiete auszuweisen, in denen Keuper-Salinar vorkommt, wurden die Karten aus Beutler et al. (2005) und im Anschluss mit den Karten des Keuper-Salinars aus BASAL (Reinhold et al. 2014) zusammengefügt (Tabelle 94, Nr. 3b & c).

Es wurde ein Layer mit dem Attribut „Salzkissen“ aus dem InSpEE-Projekt (von Goerne et al. 2016) erstellt, um Gebiete mit ausreichend mächtigen Keuper-Salinaren zu identifizieren (Tabelle 94, Nr. 3d). Der entstandene Layer wurde anschließend mit dem ermittelten Vorkommen von Keuper-Salinaren und den Flächen aus dem 3D-Modell verschnitten (Tabelle 94, Nr. 3e).

In den nächsten Schritten wurden die Mindestanforderungen angewendet. Flächen, die kleiner als 3 km² sind, wurden entfernt (Tabelle 94, Nr. 3f). Im nächsten Schritt wurden die Bohrungen mit den übrigen Flächen verschnitten (Tabelle 94, Nr. 3g). Die Bohrung Quickborn 2 liegt am Rand des Salzkissens mit Keuper-Salinar östlich des Salzstocks Quickborn und drei weitere Bohrungen (Wulfsmoor 1 und 2 sowie Moenkloh 3 (vgl. Anhang) liegen im Bereich des Keuper-Salinars des Salzkissens Hardebeck.

Unabhängig von den Informationen des Schichtenverzeichnisses liegen diese Bohrungen alle am Rand und im Bereich Hardebeck so dicht beieinander, dass sie aufgrund der Größe (8,5 und 87,2 km²) die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ weiterhin erfüllen können. Die Bohrungen enden spätestens im Gipskeuper, so dass keine Informationen zu den Keuper-Salzen vorliegen.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die lithostratigraphische Einheit Mittlerer Keuper weist gemäß der Inventarisierungstabelle für Niedersachsen (siehe Kapitel 5) in der Weser- und Grabfeld-Formation Steinsalze auf. Die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ wird daher für die verbleibenden Gebiete als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG

Die Mächtigkeit des Keuper wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden herausgenommen.

Höchste Mächtigkeit werden in Randsenken der Salzstrukturen des zentralen Glückstadtgrabens erreicht. Auf den beiden Grabenschultern (Nord-/Ostseeregion) werden großflächig Mächtigkeiten von etwa 200 m bis 400 m erreicht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Unteren und Mittleren Keuper zusammen.

Somit wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für die verbleibenden Gebiete als **erfüllt** eingeschätzt.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG

Die Tiefenlage des Keuper wurde anhand des 3D-Modells des geologischen Untergrundes unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Die Bearbeitungsfläche Keuper liegt mehrheitlich im Teufenbereich von etwa 1500 m u. GOK. Vereinzelt (hauptsächlich über Salzkissen) liegt die Basis auch im Bereich von etwa 1000 m u. GOK.

Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher für die verbleibenden Gebiete als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, welche die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird nach der Ausweisung der Identifizierten Gebiete erneut geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 48 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Keuper in Schleswig-Holstein dargestellt.

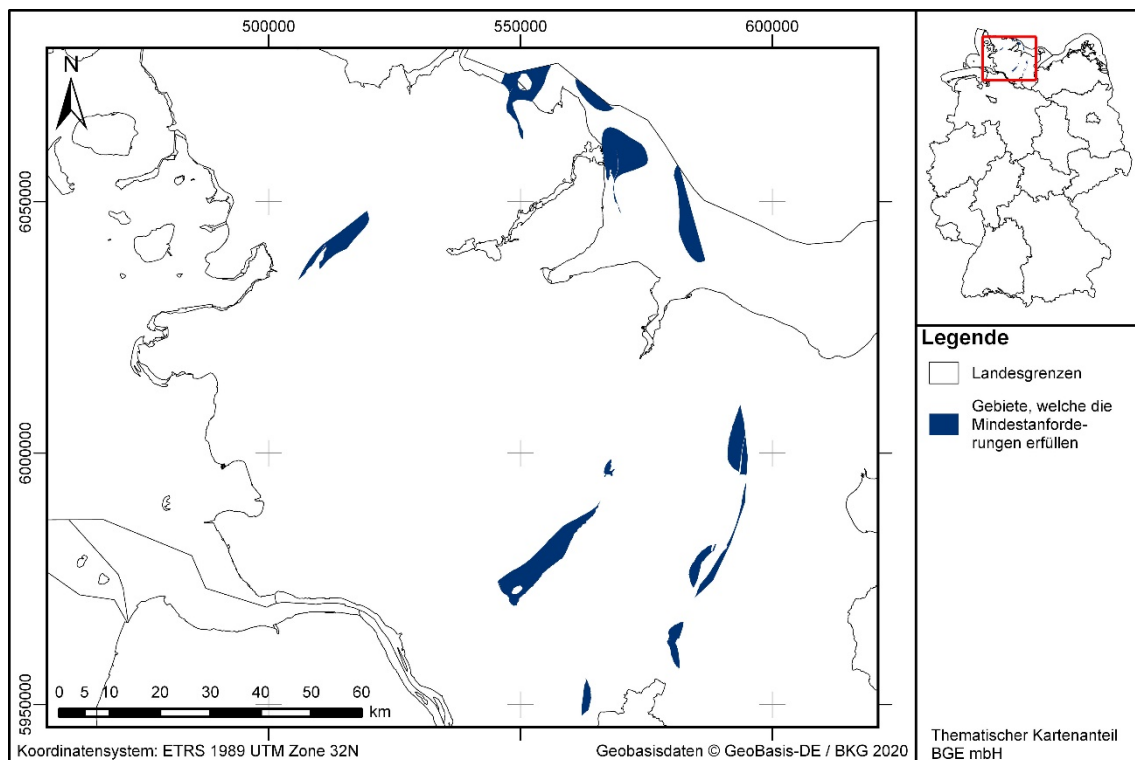


Abbildung 48: *Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für den Mittleren Keuper in Schleswig-Holstein*

Eine Auflistung der Gebiete in Schleswig-Holstein, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 95 zu finden.

Tabelle 95: *Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche*

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_s_k_SH_1	4
MG_s_k_SH_2	4
MG_s_k_SH_3	9
MG_s_k_SH_4	14
MG_s_k_SH_5	15
MG_s_k_SH_6	16
MG_s_k_SH_7	40
MG_s_k_SH_8	44
MG_s_k_SH_9	47
MG_s_k_SH_10	48
MG_s_k_SH_11	65
MG_s_k_SH_12	88

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 96 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweitung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 96: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank*

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus Datei	Beschreibung
118749 51	7723	Strukturmodell- Stör- Tief	StM_08_Basis_K: Keuper StM_09_Basis_SO: Oberer Buntsandstein	Verwendetes 3D-Modell zur Eingrenzung
118448 70_01	6815	Keuper_Salinar	StM_08_Basis_K: Keuper StM_09_Basis_SO: Oberer Buntsandstein	Die Verbreitungsgrenze des Keuper-Salinars wurde zur Eingrenzung verwendet.

118448 70_01	6819	Salzstrukt- ren_Inspee__v1_poly	Salzkissen	Die Umrisse der Salzkissen wurde zur Eingrenzung verwendet
118733 90	7713	KW_Daten	Schichtenverzeichnisse der als entscheidungserheblich eingestuften Bohrungen sind im Anhang aufgeführt	Bohrdatenbank

1.2.20 Oberjura – Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Malm, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Malm die Salzformationen der Münder-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Malm erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Oberjura (Malm), *Münder-Formation*

Der Jura kann (vom Älteren zum Jüngeren) in Lias, Dogger und Malm untergliedert werden. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen nur die Münder-Formation als jüngste Formation des Malm betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Zechsteins und deren lithologischer Ausprägung kann den Inventarisierungstabellen für Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen (Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen der Münder-Formation sind in Niedersachsen im westlichen Niedersächsischen Becken bis in das nördliche Nordrhein-Westfalen verbreitet.

Geologische Beschreibung

Die Steinsalzschichten des Oberjura sind eng mit der geologischen Entwicklung des zentralen und westlichen Niedersächsischen Beckens verknüpft (Kockel & Krull 1995). Die geographische Verbreitung beschränkt sich auf das südwestliche Niedersachsen und die angrenzenden Teile Nordrhein-Westfalens.

Von den Schichten des Oberjura und der Unterkreide, die zur „Malm-Subgruppe“ zusammengefasst sind, ist Steinsalz nur in der Münders-Formation zu finden. Dabei gibt es mehrere Steinsalzlager, die durch Schichten aus Tonstein und Anhydrit voneinander getrennt sind. Die Mächtigkeit aller Steinsalzlager beträgt in den Zentren der Senken des Niedersächsischen Beckens durchschnittlich ca. 800 m (Trusheim 1971) und erreicht stellenweise maximal ca. 1000 m (Boigk 1981). Nach außen hin zum Rand der Senken ist die Mächtigkeit der Steinsalzlager abnehmend. Während der Oberkreide haben halokinetische Prozesse zu sekundären Akkumulationsprozessen geführt, wodurch es in Teilen des Niedersächsischen Beckens zur Bildung von Salzkissen gekommen ist. Diese können Mächtigkeiten von teilweise über 2000 m erreichen (Kockel & Krull 1995).

Durch eine im Zeitraum Oberkreide bis Paläogen stattgefundene Inversion des Niedersächsischen Beckens wurden die vormals tiefer liegenden salinarführenden Schichten der Münders-Formation bis nahe an die Erdoberfläche gehoben, sodass es dort zu einer Subrosion kam (Reinhold et al. 2014). Heute liegen die Topflächen der Salzschichten wieder tiefer, zwischen 300 m u. GOK und 800 m u. GOK.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 97). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 97: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales-Gelände- Modell
3	NI	LBEG	11842295/ 7775		GTA3D	3D-Modell (Bombien et al. 2012)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Beschreibung
4	NI	LBEG	11881514/ 9105	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 1. Teil BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 2. Teil	Bohrdaten / Schichtenverzeichnisse Niedersachsen
5	NW	GD NRW	11883267/ 8852	mdb	Bohrungen_NRW	Bohrdatenbank Nordrhein-Westfalen
6	NW	GD NRW	11883267/ 8860	pdf	Schichtenverzeichnisse	Schichtenverzeichnisse Nordrhein-Westfalen
7	DE	BGR	11844870/ 6810	mpk	Malm_Salinar_jo	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)

Eigenrecherche

Es wurden keine zusätzlichen thematischen Karten oder andere geologische Informationen zur Bearbeitung der Mindestanforderungen verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Malm in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen geprüft wurde, ist in Tabelle 98 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 98: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	NI_DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; NI_DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Malm aus der Basisfläche Oberjura-Wealden (aus allen Kacheln)	b_Malm_NI.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit < 100 m löschen	b_Malm_NI_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Malm_NI_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_jo_NI.dxf MG_s_jo_NI.txt
3. Integration von 2D geologischen Informationen	
a) Polyline-Featureclass in Polygon umwandeln	Malm_polygon
b) Zusammenführen	Malm_polygon_diss
c) Verschneiden mit BASAL-Karte	Malm_polygon_diss_clip
d) Erweiterung aufgrund der BASAL-Karte und Informationen aus Bohrungen	Bohrungen_NI
e) Erweiterung um BASAL-Flächen in NRW	
f) Prüfen der Bohrungen aus NRW	Bohrungen_NW
g) Extrapolation und Verknüpfung der Gebiete beider Bundesländer	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
h) Zerschneiden in einzelne Features	Malm_polygon_diss_clip_cut
i) Löschen von zu kleinen Gebieten	
j) Export einer shp-Datei	Malm_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 98 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D; Bombien et al. 2012) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell ist die digitale Umsetzung des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = Digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tpl = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich

aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg ab, sowie weite Teile von Niedersachsen bis auf den südlichen Bereich ab Höhe Göttingen.

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 98 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisfläche 10_jo-Wd wurde als Bearbeitungsfläche des Malm verwendet (Tabelle 98, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 98, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 98, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 98, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Malm und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen der Marinen Unterkreide, Oberkreide, Oberpaläozän bis Untereozän, Mitteleozän bis Unteroligozän, Rupel bis Oberoligozän, Untermiozän, Mittelmiozän bis Pliozän, Quartär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 98, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 98, Nr. 2f).

Falls in dem Bearbeitungsgebiet 3D-gepufferte Störungen vorhanden sind, wird aus dem Verschnitt mit der Bearbeitungsfläche eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wird. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wird berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche werden gelöscht (Tabelle 98, Nr. 2g).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 98, Nr. 2h). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der

Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten. Vereinzelt werden Bohrungsdaten in Kombination mit 2D-Profileschnitten herangezogen, um zusätzliche Informationen zur Tiefenlage bzw. Lagerung und Mächtigkeit des Horizonts in der endlagerrelevanten Tiefe zu erhalten.

Die Bearbeitungsfläche Malm wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 98, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Die Salzformationen des Malm umfassen nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im verwendeten 3D-Modell des Landes Niedersachsen (Bombien et al. 2012). Durch die Verwendung thematischer Karten und Bohrungsinformationen können Gebiete über die Auswertung des 3D-Modells hinaus spezifischer ausgewiesen werden, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

Alle verwendeten Informationen wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengefasst. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden erläutert und sind der Tabelle 98 zu entnehmen.

Niedersachsen

1. Einladen der DXF-Dateien in ArcGIS.
2. Erstellen eines Polygon-Feature (Tool „Neue Feature-Class“) und kopieren der Objekte und Attribute aus der DXF-Datei in das neue shape (Tabelle 98, Nr. 3a).
3. Auflösen der feinmaschigen Struktur (Werkzeug „Dissolve“), damit nur ein Objekt vorliegt (Tabelle 98, Nr. 3b).
4. Verschneiden mit Verbreitungskarte von Malm-Salinaren (Abb. 26 aus Reinhold et al. 2014), um alle überlappenden Gebiete zu erhalten (Tool „Clip“). Einige Gebiete aus dem 3D-Modell wurden auf diese Weise eliminiert (Tabelle 98, Nr. 3c).
5. Erweiterung der Gebiete um den Bereich, der in der BASAL-Karte als „strukturbildende Salinare“ gekennzeichnet ist (Tabelle 98, Nr. 3d).
6. Prüfung aller Bohrungen von Niedersachsen auf ihre Relevanz zu Malm-Salinaren. Die meisten Bohrungen, die Malm-Salz in erforderlicher Tiefe und Mächtigkeit anzeigen, liegen innerhalb der bisher erstellten Fläche. Drei weitere Bohrungen liegen knapp außerhalb davon und somit wurde die Fläche an diesen Stellen der vorhandenen Struktur folgend erweitert. Gab es keine Hinweise aus dem 3D-Modell, wurde die Fläche um den doppelten Abstand von der vorherigen Flächengrenze zur Bohrung erweitert (Tabelle 98, Nr. 3d).

Nordrhein-Westfalen

Die Fläche in Nordrhein-Westfalen wurde mangels Informationen aus 3D-Modellen auf Grundlage von oben beschriebener Fläche in Niedersachsen, der Verbreitungskarte aus

dem BASAL-Bericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und Informationen aus Bohrungen folgendermaßen extrapoliert:

1. Konstruktion der Gebiete ausgehend von Stellen entlang der Landesgrenze, an denen die Fläche aus Niedersachsen endet. Sie erfolgte in Abhängigkeit der Verbreitungskarte von Malm-Salinaren (Abb. 26 aus Reinhold et al. 2014). An acht Stellen ist dieses der Fall. Die Beschreibung erfolgt entlang der Grenze von Westen nach Osten (Tabelle 98, Nr. 3e):
 - a. An der westlichsten Stelle wurde der ganze Bereich der von Reinhold et al. (2014) markierten Salinarverteilung in die Fläche übernommen.
 - b. An der nächsten Stelle erfolgte eine viertelkreisförmige Erweiterung der Fläche.
 - c. An den anderen Stellen, die im nordöstlichen Teil von Nordrhein-Westfalen nahe beieinander liegen, wurde die Erweiterung wieder entlang der von Reinhold et al. (2014) markierten Salinarverteilung vorgenommen. Größtenteils erfolgte die Erweiterung entlang der Verteilungsgrenze, nur im Süden erfolgte sie, in Abhängigkeit der aus dem 3D-Modell extrahierten Fläche von Niedersachsen in einer Entfernung von etwa 1 km zu der Verteilungsgrenze.
2. Prüfung aller Bohrungen von Nordrhein-Westfalen auf Ihre Relevanz zu Malmsalinaren. Alle Bohrungen, die Malm-Salze in erforderlicher Tiefe und Mächtigkeit anzeigen, liegen innerhalb der extrapolierten Fläche. Somit ist keine Erweiterung erfolgt (Tabelle 98, Nr. 3f).
3. Prüfung, ob die erstellten Flächen innerhalb der Fläche „Oberjura“ aus dem 3D-Modell von Nordrhein-Westfalen liegen. Dies ist der Fall, somit ist keine weitere Veränderung der erstellten Flächen erfolgt.

Folgende Bearbeitung erfolgte **für beide Bundesländer zusammen**:

1. Verbinden (Werkzeug „Zusammenführen“) der länderübergreifenden Gebiete, damit keine Lücken an der Ländergrenze entstehen (Tabelle 98, Nr. 3g).
2. Zerschneiden der Fläche in einzelne Gebiete (Werkzeug „Trennen“) (Tabelle 98, Nr. 3h)
3. Bestimmung des Flächeninhalts der Gebiete, Eliminierung zu kleiner (kleiner als 3 km²) Gebiete (Tabelle 98, Nr. 3i)
4. Benennung der einzelnen Gebiete („Malm_MA_1“, ...)
5. Export der shape-Datei zur weiteren Verwendung (Tabelle 98, Nr. 3j).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10⁻²¹ m² und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von

selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Bornemann et al. 2003; Fischbeck & Bornemann 1993). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die Steinsalzsichten der Münder-Formation haben gemäß der Inventarisierungstabelle für Niedersachsen (siehe Kapitel 5) als Hauptkomponente Steinsalz. Da in allen ausgewiesenen Gebieten diese Einheiten verbreitet sind, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **erfüllt** eingeschätzt.

*Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG*

Die Mächtigkeit des Malm wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Oberjura und Wealden zusammen.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell, zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass die Salzformationen des Malm in erforderlicher Mächtigkeit vorliegen.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

*Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG*

Die Tiefenlage des Malm wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzten Bohrungen (vgl. Anhang), dass die Salzformationen des Malm in erforderlicher Tiefe vorliegen.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die

diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der Identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 49 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Malm in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen dargestellt.

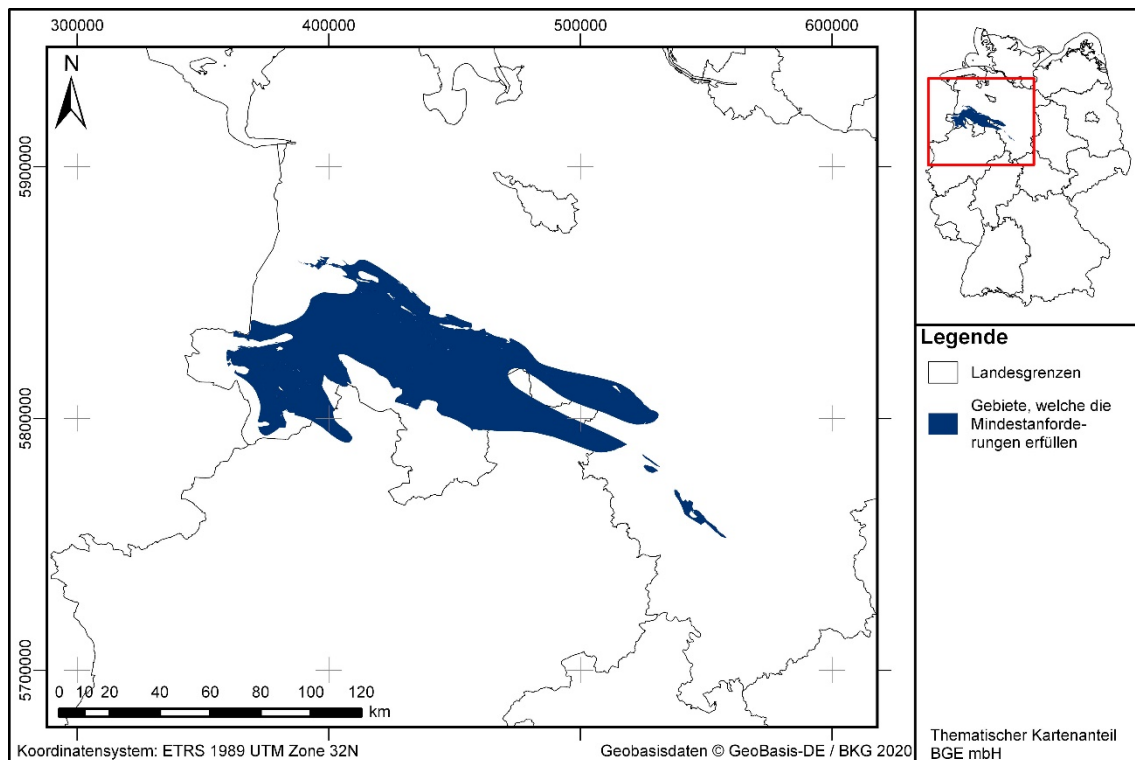


Abbildung 49: *Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Malm in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen*

Das Querprofil in Abbildung 50 zeigt einen exemplarischen geologischen Schnitt durch das westliche Niedersachsen im Bereich Alfhausen-Damme.

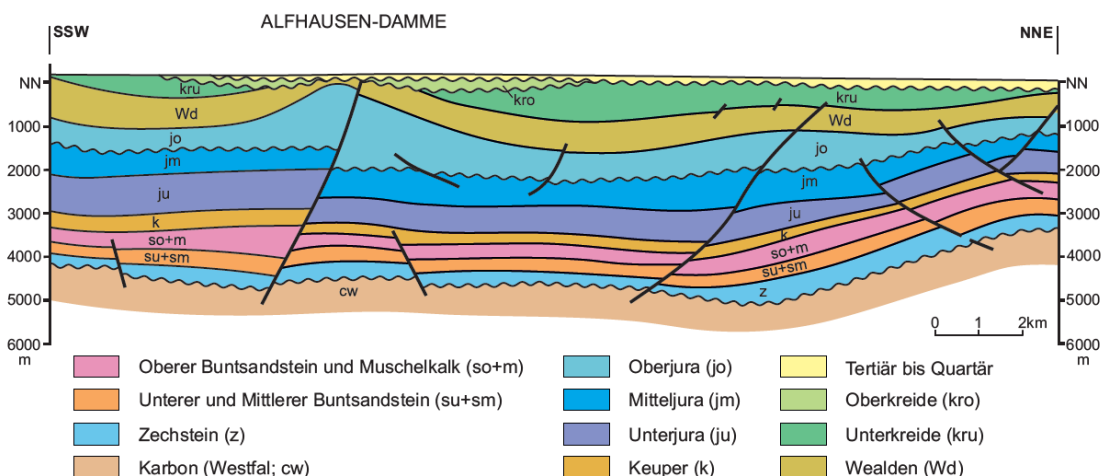


Abbildung 50: Profilschnitt im Bereich Alfhausen-Damme. Die Malmsalinare gehören zum Oberjura (jo) (Reinhold et al. 2014)

Eine Auflistung der Gebiete in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 99 zu finden.

Tabelle 99: Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
Malm_MA_1	62
Malm_MA_2	10
Malm_MA_3	5
Malm_MA_4	17
Malm_MA_5	5361

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 100 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 100: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11842 295	7775	GTA3D		Verwendetes 3D-Modell (Bombien et al. 2012)

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11881514	9105	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300 m 1. Teil BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300 m 2. Teil	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind im Anhang 1 zu finden	Bohrdaten / Schichtenverzeichnisse Niedersachsen
11883267	8852	Bohrungen_NRW	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind im Anhang 1 zu finden	Bohrdatenbank Nordrhein-Westfalen
11883267	8860	Schichtenverzeichnisse	Schichtenverzeichnisse Nordrhein-Westfalen: die entscheidungserheblichen SV sind im Anhang zu finden	Schichtenverzeichnisse Nordrhein-Westfalen
11844870	6810	Malm_Salinar_jo	Verbreitungsgrenze	Verbreitungskarte Malmsalinar (Reinhold et al. 2014); wurde stellenweise zur Grenzziehung verwendet

1.2.21 Tertiär, Wittelsheim-Fm. – Baden-Württemberg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Tertiär, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Steinsalz enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Baden-Württemberg. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommen für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) innerhalb des Tertiär die Salzformationen der Wittelsheim-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Tertiär erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Baden-Württemberg, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen** (vgl. Anhang in BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Tertiär, Mittleres Eozän bis Frühes Oligozän, *Wittelsheim-Formation*

Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Steinsalz (vgl. Kapitel 4.1.1 in BGE 2020j) wird in Baden-Württemberg die Wittelsheim-Formation betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphische Einheit Tertiär und ihre lithologische Ausprägung kann der Inventarisierungstabelle für Baden-Württemberg (Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Salzformationen der Wittelsheim-Formation (Tertiär) sind im Oberrheingraben verbreitet.

Geologische Beschreibung

Die Bildung der Steinsalzsichten (Pechelbronn- und Haguenau-Sichten) der Wittelsheim-Formation (räumlich begrenzt auf den Bereich des Oberrheingrabens) beginnt im Mittleren Eozän, zeitlich korreliert mit dem Beginn der Bildung des Oberrheingrabens.

Die ältesten paläogenen Sedimente, zu denen auch die Steinsalzschichten der Wittelsheim-Formation zählen, sind hauptsächlich im südlichen Teil des Oberrheingrabens zu finden, es gibt jedoch auch vereinzelt Salzgebiete im Mittleren Oberrheingraben (Reinhold et al. 2014). Die zentralen Teile des Oberrheingrabens sind durch Halit-führende Schichten und tonig-mergelige Sedimente mit Anhydritlagen und -knollen geprägt. Teilweise erreichen die salinaren Schichtenfolgen der Wittelsheim-Formation mehr als 1000 m Mächtigkeit (Geyer et al. 2011).

Die Steinsalzschichten in der Wittelsheim-Formation sind in Untere, Mittlere und Obere Salzfolge eingeteilt. Die Untere und Mittlere Salzfolge sind bis ca. 300 m mächtig, den Großteil macht demnach die Obere Salzfolge aus. In diese sind bis zu mehreren Metern mächtigen Wechsellagerungen von Steinsalz- und Kalisalzschichten eingeschaltet (Geyer et al. 2011).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 101). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 101: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	BW	LGRB	11897864/954 3	ts	GeORG	3D-Modell des Oberrheingrabens (GeORG-Projektteam 2013a, 2013b)
2	DE	BKG	11875056/772 8	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
3	DE	BKG	11865482/885 3	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
4	BW	UMBW/ LGRB	11873083/776 7	csv	datenbank_export_adb	Bohrdatenbank
5	DE	BGR	11844870/681 6	mpk	Tertiär_Salinär	Verbreitungskarte aus BASAL-Studie (Reinhold et al. 2014)

Eigenrecherche

Für die Anwendung der Mindestanforderungen im Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung im Tertiär in Baden-Württemberg waren keine weiteren Daten oder Karten erforderlich.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Tertiär in Baden-Württemberg geprüft wurde, ist in Tabelle 102 aufgelistet. Zudem werden im Folgenden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 102: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Tertiär aus der Basisfläche Tertiär	b_Tertiar_s_BW.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	b_Tertiar_s_BW_MACRORESULT.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
g) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	b_Tertiar_s_BW_MACRORESULT_AK.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Tertiar_s_BW_MACRORESULT_AK_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_s_t_BW.dxf MG_s_t_BW.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Polyline-Featureclass in Polygon umwandeln	Tertiär_polygon
b) Zusammenführen	Tertiär_polygon_diss
c) Verschneiden mit BASAL-Karte	Tertiär_polygon_diss_clip
d) Prüfung der Bohrungen	Bohrungen_BW
e) Zerschneiden in einzelne Features	Tertiär_polygon_diss_clip_cut
f) Löschen von zu kleinen Gebieten	
g) Export einer shp-Datei	Tertiärsalz_final

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 102 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell ist das GeORG-Modell, dass in einem EU-Projekt entstand und vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau von Baden-Württemberg (LGRB) zur Verfügung gestellt wurde. Das GeORG-Modell ist ein detailliertes Modell des Oberrheingrabens und bildet 12 stratigraphische Einheiten sowie Störungsflächen ab (GeORG-Projektteam 2013a, 2013b):

- Basis Lockergesteine (010_blg)
- Basis Landau-Formation (020_bhy)
- Basis Froidefontaine-Formation (040_bff)
- Basis Tertiär (050_bt)
- Basis Oberjura (060_bjo)
- Oberfläche Haupttrogenstein (070_thr)
- Basis Unterjura (090_bju)

- Basis Keuper (100_tms)
- Oberfläche Muschelkalksalinar (110_tms)
- Basis Muschelkalk (120_bmu)
- Basis Trias (130_btr)
- Oberfläche Grundgebirge (170_tkr)

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 102 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Tertiär wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche Tertiär (050_bt) verwendet (Tabelle 102, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Sachsen-Anhalt wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 102, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 102, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 102, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Tertiär und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen Froidefontaine-Formation (040_bff) und Lockergesteine (010_blg) sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 102, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht (Tabelle 102, Nr. 2f).

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen für die ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert wurde (vgl. BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht (Tabelle 102, Nr. 2g).

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ m u GOK überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert. Bereiche die außerhalb von Baden-Württemberg lagen, wurden gelöscht (Tabelle 102, Nr. 2h).

Die Bearbeitungsfläche Tertiär wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 102, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Das Wirtsgestein Steinsalz umfasst nur einen Teil der verfügbaren modellierten stratigraphischen Einheit im GeORG Modell (GeORG-Projektteam 2013a, 2013b). Durch die Verwendung von thematischen Karten und Bohrungsdaten wurden Gebiete spezifischer ausgewiesen, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Alle verwendeten Informationen sind in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengefasst (Tabelle 102, Nr. 3). Die einzelnen Schritte sind der Tabelle 102 zu entnehmen.

1. Einladen der DXF-Dateien in ArcGIS.
2. Erstellen eines Polygon-Feature (Tool „Neue Feature-Class“) und kopieren der Objekte und Attribute aus der DXF-Datei in das neue Shape (Tabelle 102, Nr. 3a).
3. Auflösen der feinmaschigen Struktur (Tool „Dissolve“), damit nur ein Objekt vorliegt (Tabelle 102, Nr. 3b).
4. Verschneiden mit Verbreitungskarte von Tertiärsalinaren (Abb. 29D aus Reinhold et al. 2014), um alle überlappenden Gebiete zu erhalten (Tool „Clip“). Einige Gebiete aus dem 3D-Modell wurde auf diese Weise eliminiert (Tabelle 102, Nr. 3c).
5. Prüfung aller Bohrungen von Baden-Württemberg auf ihre Relevanz zu Tertiärsalinaren. Alle Bohrungen, die Tertiärsalz in erforderlicher Tiefe und Mächtigkeit anzeigen, liegen entweder innerhalb der bisher erstellten Fläche oder in Gebieten, die durch die vorherige Anwendung des Ausschlusskriteriums „Aktive Störungszonen“ ausgeschlossen wurden. Somit findet keine Erweiterung der Fläche statt (Tabelle 102, Nr. 3d).
6. Überprüfung der Lage der Fläche. Die Fläche liegt komplett innerhalb des Staatsgebietes der Bundesrepublik Deutschland und somit ist keine weitere Beschneidung notwendig.
7. Zerschneiden der Gesamtfläche in einzelne Gebiete (Werkzeug „Trennen“) (Tabelle 102, Nr. 3e), Bestimmung des Flächeninhalts der Gebiete, Eliminierung zu kleiner ($< 3 \text{ km}^2$) Gebiete (Tabelle 102, Nr. 3f).
8. Benennung der einzelnen Gebiete („Tertiär_MA_1“, ...), anschließender Export der shape-Datei zur weiteren Verwendung (Tabelle 102, Nr. 3g).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG

Steinsalz hat im unverritzten Zustand eine Permeabilität von kleiner gleich 10^{-21} m^2 und eine Porosität von kleiner 0,02 % (Wieczorek et al. 2014), mögliche Klüfte verheilen von

selber (Borchert & Muir 1964). In Steinsalz selber sind aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003). Ferner gibt der Referenzdatensatz für Steinsalz, der für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellt wurde, für den Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ eine günstige Bewertung an (BGE 2020b). Dieses ist gleichzusetzen mit Gebirgsdurchlässigkeiten von 10^{-12} m/s und weniger.

Die Steinsalzsichten der Wittelsheim-Formation enthalten gemäß der Inventarisierungstabelle für Baden-Württemberg (siehe Kapitel 5) Steinsalz. Da in allen ausgewiesenen Gebieten diese Einheit verbreitet ist, wird die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ als **erfüllt** eingeschätzt.

*Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG*

Die Mächtigkeit des Tertiär wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht. Die Mächtigkeit der Unteren Tertiärformationen (Schliengen- und Wittelsheim-Formation) wurde zwischen der Basis Tertiär und der Basis Froidefontaine-Formation bzw. Basis-Lockergesteine berechnet.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzen Bohrungen (vgl. Anhang), dass die Salzformationen des Tertiär in erforderlicher Mächtigkeit vorliegen.

Für die verbleibenden Gebiete die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

*Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG*

Die Tiefenlage des Tertiär wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen die bereits zur Flächenbearbeitung benutzen Bohrungen (vgl. Anhang), dass die Salzformationen des Tertiär in erforderlicher Tiefe vorliegen.

Für die verbleibenden Gebiete die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG

Für Salz in flacher Lagerung wird ein Flächenbedarf von mindestens 3 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die die oben genannten Mindestanforderungen erfüllen, wurden auf den entsprechenden Flächenbedarf hin überprüft. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen an Bundeslandgrenzen. Der Flächenbedarf wird nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 51 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Tertiär in Baden-Württemberg dargestellt. Abbildung 52 zeigt einen Profilschnitt durch den Oberrheingraben im Bereich Kleinfrankenheim bis Renchen.

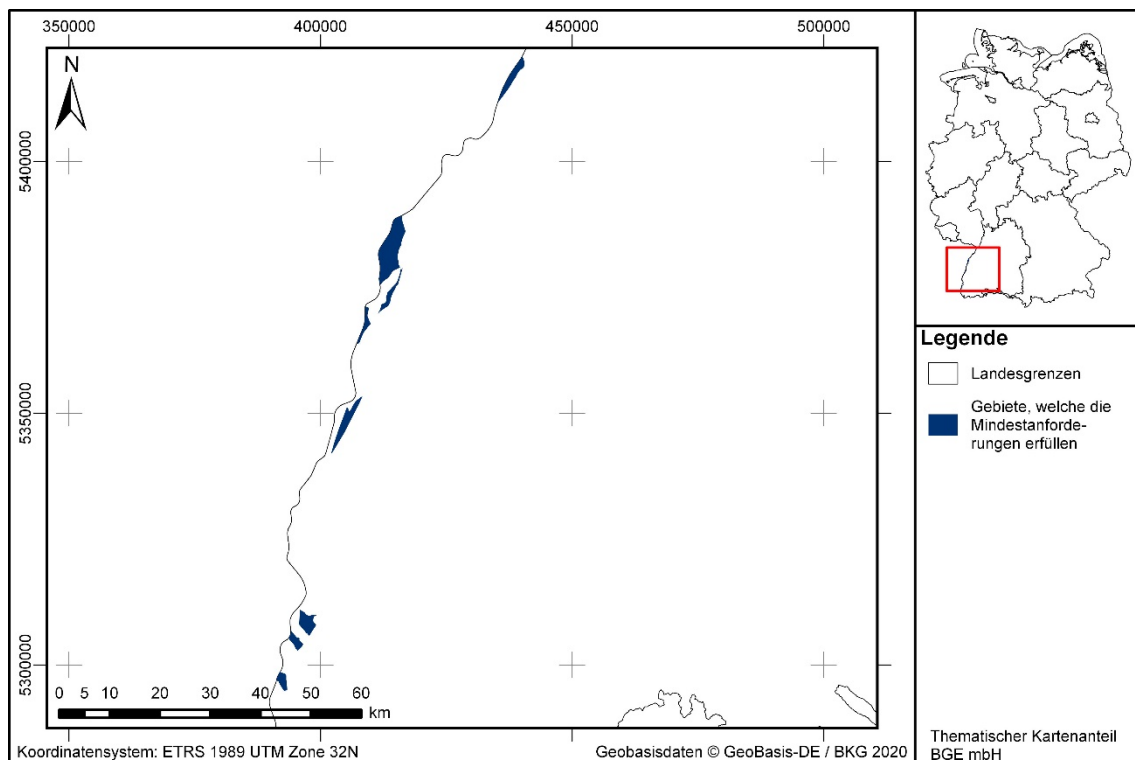


Abbildung 51: *Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für Tertiär in Baden-Württemberg*

Eine Auflistung der Gebiete in Baden-Württemberg, welche die Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 103 zu finden.

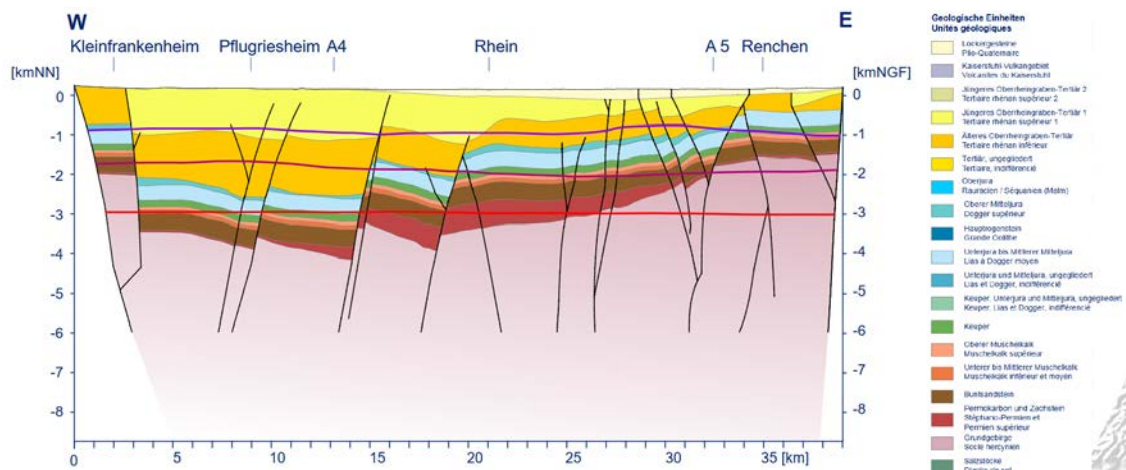


Abbildung 52: Ausschnitt aus dem Profilschnitt durch den Oberrheingraben im Bereich Kleinfrankenheim bis Renchen (GeORG-Projektteam 2013b)

Tabelle 103: Auflistung aller Gebiete in Baden-Württemberg, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Fläche

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
Tertiär_MA_1	5
Tertiär_MA_2	5
Tertiär_MA_3	10
Tertiär_MA_4	13
Tertiär_MA_5	5
Tertiär_MA_6	6
Tertiär_MA_7	39
Tertiär_MA_8	10

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 104 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 104: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank*

DokID	Gruppen-ID	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11897864	9543	GeORG		Verwendetes 3D-Modell des Oberrheingrabens
11873083	7767	datenbank_export_adb	Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgeführt.	Bohrdatenbank
11844870	6816	Tertiär_Salinanar	Verbreitungsgrenze	Verbreitungskarte Tertiär-Salinanar wurde teilweise zur Grenzziehung verwendet

1.3 Tongestein

1.3.1 Karbon, Ziegelschiefer-Fm. – Nordrhein-Westfalen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Ziegelschiefer-Formation (Karbon), die aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Nordrhein-Westfalen (NW).

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die geologischen Einheiten der Ziegelschiefer-Formation erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Bayern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Geographische Verbreitung:

Im Bereich des Ruhrgebietes steht das Karbon an der Geländeoberfläche an bzw. liegt unter einer geringmächtigen Quartär-Überdeckung. In Richtung des Niedersächsischen Beckens taucht die Formation zunehmend ab und liegt im Bereich des Münsterlandes bereits in über 1.000 m Tiefe Höhennormalnull (Drozdrewski 2005).

Stratigraphie

Karbon, Oberkarbon, Namur; Ziegelschiefer-Fm.

Das Karbon unterteilt sich in Unterkarbon (Dinantium) und Oberkarbon (Silesium). Die unterste Stufe des Oberkarbon ist das Namur (entspricht etwa dem Unterpennsylvanium), welches wiederum in die Unterstufen Namur A, Namur B und Namur C gegliedert wird. Im oberen Namur B, am Übergang zum Namur C, kam es im Verbreitungsgebiet in Nordrhein-Westfalen zur Ablagerung der Ziegelschiefer-Formation.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Karbon und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Nordrhein-Westfalen entnommen werden (vgl. Kapitel 5).

Fazies/Ablagerungsraum:

Die Ziegelschiefer-Formation (Ziegelschiefer-Fm.) wurde im Subvariszischen Vorlandbecken (bzw. Saumsenke) (Meschede 2018) abgelagert. Das Subvariszische Vorlandbecken ist ein Südwest-Nordost verlaufendes Sedimentbecken, welches sich vor der variszischen Deformationsfront erstreckt und durch das Rheinische Schiefergebirge im Süden und das Brabanter Massiv westlich des Aachener Beckens begrenzt wird. Im Subvariszischen Vorlandbecken änderte sich die Fazies im Namur von vollmarinen zu brackisch limnisch/fluviatilen (paralischen) Verhältnissen (Grabert 1998a). Im Namur A und B wurden überwiegend im südlichen Ruhrgebiet marine Sedimente abgelagert. Vom Namur C bis Westfal B herrschte dort eine Untere Deltaebene. Die gröberklastische Sedimentation begann bereits im Unterkarbon und führte zur Ablagerung der Kulm-Grauwacke. Diese setzte sich im Namur fort und das flözführende Oberkarbon zeigt schließlich einen küstennahen terrestrischen Ablagerungsraum zwischen dem sich im Süden bildenden variszischen Gebirge sowie den Ausläufern des Nordmeeres an. Die Ziegelschiefer-Fm. markiert diese Übergangszeit, in der hauptsächlich flachmarine Sedimente mit zum Hangenden zunehmendem Gehalt an organischem Kohlenstoff und abnehmendem Karbonatgehalt abgelagert wurden (Grabert 1998a; Ghazwani 2017).

Lithologie:

Das Namur ist durch Wechselfolgen von marinen Kalksteinen und Tonsteinen, Sumpfwald-Ablagerungen sowie fluviatilen Sand- und Tonsteinen gekennzeichnet. Es treten keine (bauwürdigen) Kohleflöze auf (Grabert 1998a). Die namurische Ziegelschiefer-Fm. ist lithofaziell sehr variabel und besteht zu ungefähr 44 % aus Tonmineralen und zu ungefähr 34 % aus Quarz. Hinzu treten teilweise stark karbonatische Intervalle. Der durchschnittliche organische Kohlenstoffgehalt beträgt 1,2 %. Innerhalb der Tonminerale der Ziegelschiefer-Fm. bildet Illit/Muskovit mit 79 % den dominanten Hauptbestandteil. Häufigster Bestandteil in den karbonatischen Intervallen ist mit 87 % Dolomit/Ankerit. Als durchschnittliche Porosität werden für die Ziegelschiefer-Fm. 12,25 % sowie eine Permeabilität von 0,11 μD angegeben (Ghazwani 2017).

Mächtigkeit:

Die Abfolge der Ziegelschiefer-Fm. tritt in Nordrhein-Westfalen mit einer Mächtigkeit bis zu 400 m auf (Geologischer Dienst NRW, DokID 11842255).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 105). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Es wurden vom Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW) GIS-Dateien der Verbreitung von Tongesteinen der Ziegelschiefer-Fm. innerhalb des Teufenbereiches zwischen 300 m und 2.000 m u. GOK geliefert (DokID_11842255/141/9367). Zudem wurde darauf hingewiesen, dass diese vorgeschlagenen Gebiete auf dem „Geologischen 3D-Landesmodell“ basieren, das für weite Teile von NRW als grobe Übersichtsdarstellung vorliegt.

Die BGE hat die durch den geologischen Dienst von Nordrhein-Westfalen (GD NRW) bereitgestellten Informationen zur Verbreitung geeigneter Tongesteinshorizonte in Nordrhein-Westfalen (NRW) hinsichtlich ihrer Nachvollziehbarkeit geprüft. Die Nachvollziehbarkeit der gelieferten Shape-Dateien wurde anhand von durch den GD NRW übermittelten Bohrungen sowie dem geologischen Landesmodell NRW bewertet.

Bei der vor dem Hintergrund der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG vorgenommenen Prüfung der Nachvollziehbarkeit der Ausdehnung, Teufenlage und Mächtigkeit durch den GD NRW übergebenen Informationen zum potentiellen Tongesteinshorizont Ziegelschiefer-Fm. kommt die BGE zu der Einschätzung, dass die Prüfung hinsichtlich der Kriterien Teufenlage und Mächtigkeit nicht möglich ist und die räumliche Verbreitung nicht nachvollziehbar ist.

Daher erfolgt die Ausweisung von Gebieten, die alle Mindestanforderungen erfüllen, nach dem Konzept der Anwendung der Mindestanforderungen der BGE (vgl. Kapitel 6 BGE 2020j).

Tabelle 105: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales Gelände- Modell
3	NW	GD NRW	11883267/ 8849	ts	Landesmodell_NRW	3D-Landesmodell von NRW
4	NW	GD NRW	11842255/ 7533	shp	Ziegelschiefer_For- ma- tion_GK100_Schnitt e	Profilschnitte
5	NW	GD NRW	11842255/ 7534	shp	Ziegelschiefer_For- mation_HK100	Ausbiss der Ziegel- schiefer-Formation

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
6	NW	GD NRW	11842255/ 142	doc	2018_06_25_BGE_Datenlieferung_Mindestanforderungen_Antwortschreiben_Anlagen.doc	Antwortschreiben des GD NRW zur Abfrage der Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß Standortauswahlgesetz, incl. Anlage Prognostische lithologische Gliederung
7	NW	GD NRW	11842255/ 7534	shp	Ziegelschiefer_Formation_HK100.shp	Verbreitung Ziegelschiefer-Fm.
8	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Ziegelschiefer-Formation in Nordrhein-Westfalen geprüft wurde, ist in Tabelle 106 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 106: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
7. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
8. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
t) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
u) Erstellen der Bearbeitungsfläche Dogger aus der Basisfläche Dogger (aus allen Kacheln)	b_Karbon_NW.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
v) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
w) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
x) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
y) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Karbon_NW_MACRORESULT.ts
z) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	b_Karbon_NW_MACRORESULT_AK.ts
aa) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Karbon_NW_MACRORESULT_qs.ts
bb) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_c_NW.dxf
9. 2D-Bearbeitung	
a) Sichtung der Eingangsdaten	
b) Bewertung Mindestanforderungen	

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 106 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell NRW ist ein Übersichtsmodell, dessen Grundlage häufig auf Ergebnissen aus unterschiedlichen Projekten beruht, deren Ergebnisflächen untereinander nicht konsistent abgestimmt wurden. Datenbasis und somit die Genauigkeit sind regional sehr unterschiedlich. Die Basisflächen Karbon Basis, Mitteldevon Basis

sowie die Einheiten „Emscher Formation“ und „Wealden-Formation“ wurden nicht vollständig modelliert und sind lediglich angenäherte Darstellungen, um eine ungefähre Vorstellung von Tiefenlage und Mächtigkeit zu ermitteln.

Das Landesmodell weist eine Top- und elf Basisflächen für stratigraphische Einheiten sowie jeweils eine Top- und Basisfläche für Formationen auf:

- gg_q_b (Quartär Basis)
- gg_t_b (Tertiär Basis)
- gg_kroha_b (Halterner Sande Basis)
- gg_kro_b (Oberkreide Basis)
- gg_kr_b (Kreide Basis)
- gg_j_b (Jura Basis)
- gg_tr_b (Trias Basis)
- gg_z_b (Zechstein Basis)
- gg_r_b (Rotliegend Basis)
- gg_praep_t (Präperm Top)
- gg_c_b (Karbon Basis, unvollständig)
- gg_dm_b (Mitteldevon Basis, unvollständig)

Formationen:

- Emscher_Form_t (Emscher Formation Top, unvollständig)
- Emscher_Form_b (Emscher Formation Basis, unvollständig)
- Wealden_t (Wealden Top, unvollständig)
- Wealden_b (Wealden Basis, unvollständig)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 106 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Karbon wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche Karbon (gg_c_b) verwendet (Tabelle 106, Nr. 2b).

Das digitale Geländemodell für Nordrhein-Westfalen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 106, Nr. 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 106, Nr. 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 106, Nr. 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Karbon und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus der Basisfläche Präperm sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM__{-300m}) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM__{-1500m} angehoben (Tabelle 106, Nr. 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde (Tabelle 106, Nr. 2f).

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen mit Sicherheitsabständen. Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen, deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht (Tabelle 106, Nr. 2g).

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ m u GOK“ überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert. Bereiche außerhalb von Nordrhein-Westfalen wurden gelöscht (Tabelle 106, Nr. 2h).

Die Bearbeitungsfläche Karbon wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 106, Nr. 2i).

2D-Bearbeitung

Für die 2D-Bearbeitung wurden im ersten Schritt die Eingangsdaten (einschließlich der Bohrdaten) gesichtet (Tabelle 106, Nr. 3a) und fachlich auf die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG geprüft (Tabelle 106, Nr. 3b). Die Bewertung jeder einzelnen Mindestanforderung ist in Kapitel 0 festgehalten.

Datenlieferung

Der Geologischen Dienstes NRW stuft die Ziegelschiefer-Fm. des Oberkarbon als untersuchungswürdige Tonstein-Formation ein. Dazu wurde zusätzlich zur ausgewiesenen Verbreitung eine prognostische-lithologische Gliederung des Teufenbereiches zwischen 300 und 2000 m u. GOK der Ziegelschiefer-Fm. übermittelt. Diese lithologische Gliederung basiert auf Daten der TK25 4608 Velbert, Velbert Ortsteil Langenhorst. Die Profile sind abgeleitet aus den prognostischen Schichtenprofilen, wie sie im Rahmen der Stellungnahmen des Geologischen Dienstes NRW in Zusammenhang mit den Sicherungsmaßnahmen (§ 21 StandAG) erstellt werden.

Darin ist die Ziegelschiefer-Fm. als 400 m mächtige Abfolge von Tonsteinen, untergeordnet Sandsteinen (Ziegelschiefer-Formation, Namur B, Oberkarbon), beschrieben.

Tonsteine der sich 520 m tiefer befindlichen Abfolge aus Kalk- und Tonsteinen des Unterkarbon sind als geschiefert beschrieben (GD NRW, DokID 11842255/142).

Geologische Schnitte der Ziegelschiefer-Fm. wurden vom Geologischen Dienst NRW als Shape-Dateien (Ziegelschiefer_Formation_GK100_Schnitte.shp) übergeben. Diese Schnitte enthalten keine Höheninformationen, zeigen aber eine erhebliche Deformation der gesamten Abfolge im Bereich des Rheinischen Schiefergebirges und eine deutliche Verfaltung sowie teilweise Überschiebung der Paläozoischen Abfolge im Bereich des Ruhrbeckens und des Aachen-Beckens.

Bohrdaten

Die der BGE vorliegenden Bohrdaten und Schichtenverzeichnisse wurden auf die lithologischen Abfolgen des Namur bzw. der Ziegelschiefer-Fm. geprüft. Diese Auswertung zeigte nur eine einzige Bohrung an, die den Filterkriterien entsprach (BNUM: 25525). Die Mächtigkeit der namurischen Tongesteine liegt in dieser Bohrung jedoch bei unter 100 m und entspricht daher nicht allen Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (Katsube & Connell 1998; Bryant 2003; Neuzil 1994). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammensetzung sowie der dadurch bedingten Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen.

Die Ziegelschiefer-Fm. wird in der Literatur als Tonsteinformation mit Anteilen von Sandstein (Quarz) und Karbonat (hauptsächlich Dolomit/Ankerit) beschrieben (Ghazwani 2017), welche lokal die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ erfüllt (siehe Kapitel 0). Weiterhin ist auf den vom Geologischen Landesamt NRW gelieferten Profilschnitten eine deutliche Deformation und Verfaltung der Formation sichtbar (Geologischer Dienst NRW). Das gesamte Namur im Subvariszikum wurde stark durch (postvariszische) Falten- und Überschiebungstektonik geprägt und zeigt teilweise senkrechtes Schichteinfallen (Drozdewski & Wrede 1994; Drozdewski 2005). Deformierte und gefaltete Tonsteine weisen an den vorhandenen Klüftungen in der Regel eine wesentlich höhere Gebirgsdurchlässigkeit als die geforderten 10^{-10} m/s auf. Das Vorhandensein von größeren Bereichen (mind. 10 km²), in denen die Ziegelschiefer-Fm. das Kriterium der geringen Gebirgsdurchlässigkeit erfüllt, ist deshalb nicht hinreichend nachweisbar. Auch Hoth et al. (2007) beschreiben präpermische Tongesteinsformationen (z. B. das Karbon) als tektonisch intensiv überprägt und somit als nicht weiter untersuchungswürdig. Die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ wird daher als **nicht erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die im Landesmodell NRW ausgewiesenen Grenzen des Karbons bzw. des Rotliegenden geben lediglich Anhaltspunkte zur Mächtigkeit. Eine Prüfung auf Tongesteinspakete mit größer 100 m Mächtigkeit ergab keine positive Bewertung (siehe Kap. 0 *Bohrdaten*). Da in der Datenlieferung des Geologischen Dienstes NRW eine Bohrung angegeben ist, die eine 400 m mächtige Ziegelschiefer-Fm. ausweist, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Des Weiteren wurden Bohrdaten hinsichtlich der Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 u. GOK geprüft. Da mindestens eine Bohrung im Namur Tiefenlagen unter 300 m, wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Im Rahmen der Bearbeitung wurden alle Gebiete ausgeschlossen, welche ein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die zusätzlich alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachtete Gesteinsformation nicht alle Mindestanforderungen (Gebirgsdurchlässigkeit) erfüllt, werden für die Gesteine des Karbon keine Gebiete in Nordrhein-Westfalen ausgewiesen.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 107 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 107: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank.

DokID	Datei-gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11883267	8849		Landesmodell_NRW		3D-Landesmodell von NRW
11842255	7533		Ziegelschiefer_Formation_GK100_Schnitte		Profilschnitte

1.3.2 Rotliegend, Meisenheim-Fm. und Standenbühl-Fm. – Saarland, Rheinland-Pfalz

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Meisenheim-Formation und Standenbühl-Formation des Saarlandes (SL) und deren Äquivalente in Rheinland-Pfalz (RP). Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet Rotliegend im Saarland und in Rheinland-Pfalz.

Das Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland (LUA) hat auf die Datenabfrage zur Übermittlung von Daten zu den Mindestanforderungen die Meisenheim-Formation (Perm, Rotliegendes, Glan-Subgruppe) und die Standenbühl-Formation (Perm, Rotliegendes, Nahe-Subgruppe) als geeignete Tongesteinsformationen genannt und aus deren Verbreitung Beschränkungsflächen erstellt. Der BGE wurden die Ergebnisse der Vorauswahl sowie die zu Grunde gelegten Informationen übergeben.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die geologischen Einheiten der Meisenheim-Formation und Standenbühl-Formation erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Saarland und Rheinland-Pfalz, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Geographische Verbreitung

Saarland, Rheinland-Pfalz

Die Rotliegend-Ablagerungen des Saar-Nahe-Beckens streichen großflächig im zentralen und südöstlichen Teil des Saarlandes sowie im zentralen Teil von Rheinland-Pfalz aus (Stapf 1989).

Die räumliche Verbreitung der Meisenheim-Fm. beschränkt sich auf die Flanken des Pfälzer Sattels (vom Raum St. Wendel im Südwesten – Raum Kusel – Raum Lautercken bis Raum Meisenheim im Nordosten sowie im Raum Rockhausen bis Wolfstein im Süden) (Stapf 1989).

Die Standenbühl-Fm. ist in der Pfälzer Mulde im SE (Raum Eisenberg), der Nahe Mulde (Raum Sobernheim) im Nordosten und der Prims-Mulde (Raum Wadern) im Südwesten anzutreffen (Stapf 1989).

Stratigraphie

Perm, Unterperm, Rotliegend, *Meisenheim-Fm.*, *Standenbühl-Fm.*

Die Meisenheim-Formation wird in die Jeckenbach-Subformation und die Odernheim-Subformation unterteilt und zählt zur übergeordneten Glan-Subgruppe des Unteren Rotliegend.

Die Standenbühl-Formation zählt zur übergeordneten Nahe-Subgruppe des Oberen Rotliegend) und des Südost-Teils der Saar-Nahe-Mulde (Raum Odernheim).

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Rotliegend und deren lithologische Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Saarland und Rheinland-Pfalz entnommen werden (vgl. Anhang 1.1)

Fazies/Ablagerungsraum

Das Saar-Nahe-Becken wurde in der Spätphase der variszischen Orogenese in Folge von Dehnung entlang älterer tektonischer Strukturen als intramontanes Kollapsbecken gebildet (Boy et al. 2012). In seiner aktiven Entwicklungsphase bis zum Unterperm (Rotliegend) lagerten sich hier hauptsächlich terrestrische Sedimente, beckenintern geförderte Magmatite und Pyroklastika sowie extern geförderte Pyroklastika in geringer Mächtigkeit ab. Die permokarbone Beckenfüllung erreichte ursprünglich eine Mächtigkeit von ungefähr 10.000 m, erosionsbedingt und aufgrund von synsedimentärer Verlagerung des Depotcenters sind heute nur noch 6.500 m erhalten geblieben.

Sowohl die Jeckenbach- als auch die Odernheim Subformation sind durch gut ausgeprägte Sedimentationszyklen gekennzeichnet. Die lakustrinen Zyklen (Hochstandsphase tiefer Seen) sind durch fein laminierte Schwarzpelite, oftmals in Verbindung mit geringmächtigen sauren Aschetuffen, Kalksteinbänken oder -konkretionen, Feinsandstein (mm-mächtige Lagen) und Turbiditen gekennzeichnet. Die sandig-konglomeratischen Abfolgen der Tiefstandsphase sind durch mehrere Meter mächtige Sandsteinbänke, die teils konglomeratisch auftreten, gekennzeichnet.

Die Ablagerungen der Standenbühl-Fm. ist durch ein deutlicher proximal-distal Trend und deren zeitliche Äquivalente charakterisiert. Ein breiter Gürtel von Schwemmfächern, welche lithostratigraphisch der Wadern-Formation zugeordnet werden und durch Brekzien und Konglomerate gekennzeichnet sind, befinden sich an den Rändern des Saar-Nahe-Beckens. Beckenwärts verzahnten diese mit sandig-pelitischen Ablagerungen einer verzweigten Flussebene. Im zentralen Becken dominieren Playa-Ablagerungen. Eine weitgehend rot gefärbte, mehr pelitische als feinsandige Fazies charakterisiert die eigentliche Standenbühl-Formation (Boy et al. 2012).

Lithologie

Die Meisenheim-Fm. besteht überwiegend aus Tonstein-Siltstein-Wechsellagerungen mit geringmächtigen Feinsandsteinlagen, einzelne mittel- bis grobkörnige Sandsteinhorizonte und Konglomerate, die Mächtigkeiten bis zu mehreren 10er-Metern erreichen. Mehrere Kohleflöze und Tuffhorizonte können in der Meisenheim-Fm. ausgehalten werden (Dok_ID 11844603/665 Datei_ID 37). In Rheinland-Pfalz ist der obere Abschnitt der Odenheimer-Subformation von Schwarzpeliten mit Einschaltungen von geringmächtigen Tuffen und Kalksteinen dominiert (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB-RLP) 2005).

Die Standenbühl-Fm. des Saarlandes besteht fast ausschließlich aus roten Siltsteinen mit wenigen geringmächtigen Sandsteinbänken (Dok_ID 11844603/665 Datei_ID 37). In Rheinland-Pfalz ist die Standenbühl-Fm. als Wechselfolge roter Sand-, Silt- und Tonsteine beschrieben. Sehr mächtige Tonsteinpakete sind möglich, wurden bisher aber nicht nachgewiesen (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB-RLP) 2005).

Mächtigkeit

Die Mächtigkeit der Meisenheim-Fm. liegt zwischen 750 m und 920 m in der becken-zentralen Fazies und geht bis auf 340 m in der Beckenrandfazies zurück.

Mächtigkeiten der Standenbühl-Fm sind mit 0 m – 60 m angegeben. Diese gelten für den Warndt und erreichen in der Pfalz bis zu 1700 m. Die Standenbühl-Fm. wird im Bereich zwischen der südlichen Hauptüberschiebung und französischer Grenze durchgehend mit nach Westen abnehmender Mächtigkeit unter dem Buntsandstein vermutet.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die in Tabelle 108 aufgelistet sind. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Für die Bearbeitung der Fragestellung wurden folgende Datensätze von Bundes- und Landesbehörden zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht über diese Daten ist in Tabelle 108 dargestellt.

Das Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland (LUA) hat auf die Datenabfrage zur Übermittlung von Daten zu den Mindestanforderungen die Meisenheim-Formation (Perm, Rotliegendes, Glan-Subgruppe) und die Standenbühl-Formation (Perm, Rotliegendes, Nahe-Subgruppe) als Tongesteinsformationen genannt und aus deren Verbreitung Beschränkungsflächen erstellt. Der BGE wurden die Ergebnisse der Vorauswahl sowie die zu Grunde gelegten Informationen übergeben. In den folgenden Kapiteln werden die Flächen und das Saar-Nahe-Becken auf die Erfüllung aller Mindestanforderungen hin untersucht.

Tabelle 108: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	SL	LUA	11839751/524	.pdf	Karte_Standort_AG_2017_12_04_groß.pdf	Karte allg.
2	SL	LUA	11839751/525	.shp	Meisenheim_Formation_Hangend-grenze.shp	Karte Meisenheim Formation
3	SL	LUA	11839751/526	.shp	Meisenheim_Formation_Liegend-grenze.shp	Karte Meisenheim Formation
4	SL	LUA	11839751/520	.shp	Beschränkungsfläche_Standortauswahlgesetz.shp	Beschränkungsflächen
5	SL	LUA	11839751/522	.shp	Flächen_Standortauswahlgesetz.shp	Flächen
6	SL	LUA	11839751/523	.shp	Flächen_Standortauswahlgesetz_Umriss.shp	Umriss
7	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6505_MerzigGK_25_	Geologische Karte
8	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6605_Hemmersdorf	Geologische Karte
9	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6606_Saarlouis	Geologische Karte
10	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6607_Heusweiler	Geologische Karte
11	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6608_Illingen	Geologische Karte
12	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6706_Ludweiler-Warndt	Geologische Karte
13	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6707_Saarbruecken	Geologische Karte
14	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6806_Lauterbach_6807_Emmersweiler	Geologische Karte
15	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6808_Kleinblittersdorf	Geologische Karte
16	SL	LUA	11844603/661	.tif	GK_25_6809_Gersheim	Geologische Karte

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
17	SL	LUA	11844603/665	.xls	Lithostratigraphische Einheiten_Saarland	Tabellarische Übersicht über Lithostratigraphische Einheiten des Saarlandes
18	DE	BGR	11881514/9108	.mdb	Bohr_dat.mdb	Bohrdatenbank KW

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die Bereiche des Saar-Nahe-Beckens im Saarland und in Rheinland-Pfalz liegt kein 3D-Modell vor.

2D-Bearbeitung

Die vom Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland (LUA) ausgewiesenen Gebiete der Standenbühl-Fm. und der Meisenheim-Fm. wurden auf die Erfüllung der Mindestanforderungen durch die BGE geprüft. Grundlage dieser Prüfung waren die vom LUA Saarland gelieferten Daten (vgl. Tabelle 108). Dabei handelt es sich unter anderem um Shape-Dateien zur Verbreitung der Meisenheim-Formation und georeferenzierte, geologische Messtischblätter. Die vom LUA Saarland ausgewiesene Ausbisslinie ist reproduzierbar. Die Tiefenlinien (0 m NN und -1.200 m NN) konnten anhand der vorliegenden Informationen nicht nachvollzogen werden. Jedoch kann anhand der gelieferten Flächen und lithologischen Angaben nicht die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit als erfüllt angenommen und wird daher im Folgenden separat geprüft. Dafür wurden lithologische Beschreibungen der Standenbühl-Fm. und der Meisenheim-Fm. des Saarlandes sowie deren Äquivalente in Rheinland-Pfalz auf Grundlage von Literatur- und gelieferten Bohrungsdaten erarbeitet, um eine Einschätzung beider Formationen als für die Endlagerung geeignetes Tongestein zu ermöglichen. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Recherche sind im Folgenden zusammengefasst.

Meisenheim-Fm.

Die Meisenheim-Fm. (Odernheim-Subformation) lässt sich in informelle Einheiten gliedern. Die Basis der Einheiten bilden mehrere Meter bis Zehner Meter mächtige, meist fossilführende Grobsandstein- bzw. Konglomerat-Sandstein-Bänke, die meist mit Tuffbänken assoziiert sind. Dazwischen lagern mehrere Zehner Meter mächtige siltig-feinsandige Sedimentgesteine. Zwischengeschaltet sind wenige Meter mächtige, fein laminierte, pelitische Ton-Silt-bis Mergelstein-Horizonte mit teilweise reicher Fossilführung, welche lokal zusammen mit geringmächtigen (wenige Zentimeter bis maximal 2 m) Tuff-Horizonten auftreten. Im Gegensatz zur Jeckenbach-Subformation ist die Odernheim-Subformation um ungefähr ein Drittel geringmächtiger und grobklastischer mit wenigen

zwischengeschalteten Sandstein-Bänken ausgebildet. Das lithologische Profil der Odernheim-Subformation der Bohrung Münsterappel 1 wird dominiert von Silt- und Tonsteinen mit geringmächtigen Einschaltungen von Sandsteinen, Tuffen und Kalksteinen. Tonsteine erreichen hier Mächtigkeiten von maximal 10 m (Haneke & Stollhofen 1994).

Die Tonsteinhorizonte der Meisenheim-Formation erreichen jeweils Mächtigkeiten von wenigen Metern (kleiner 5 m, maximal 10 m in der Bohrung Münsterappel-1), zwischengelagert sind stets Siltstein- und/oder Sandsteinhorizonte.

Standenbühl-Fm.

Die Standenbühl-Formation wird dominiert von Silt-Feinsandstein-Wechselfolgen in die Sandstein- und Konglomerat-Bänke eingeschaltet sind (vgl. Abbildung 53). Die Bohrung Landshut-1 enthält lediglich einen 6 m mächtigen Pelithorizont, der der „Grauen Leitschicht“ entspricht, welche aus dunkelgrauen Peliten und dolomitischen Kalkmergeln besteht (Boy et al. 2012).

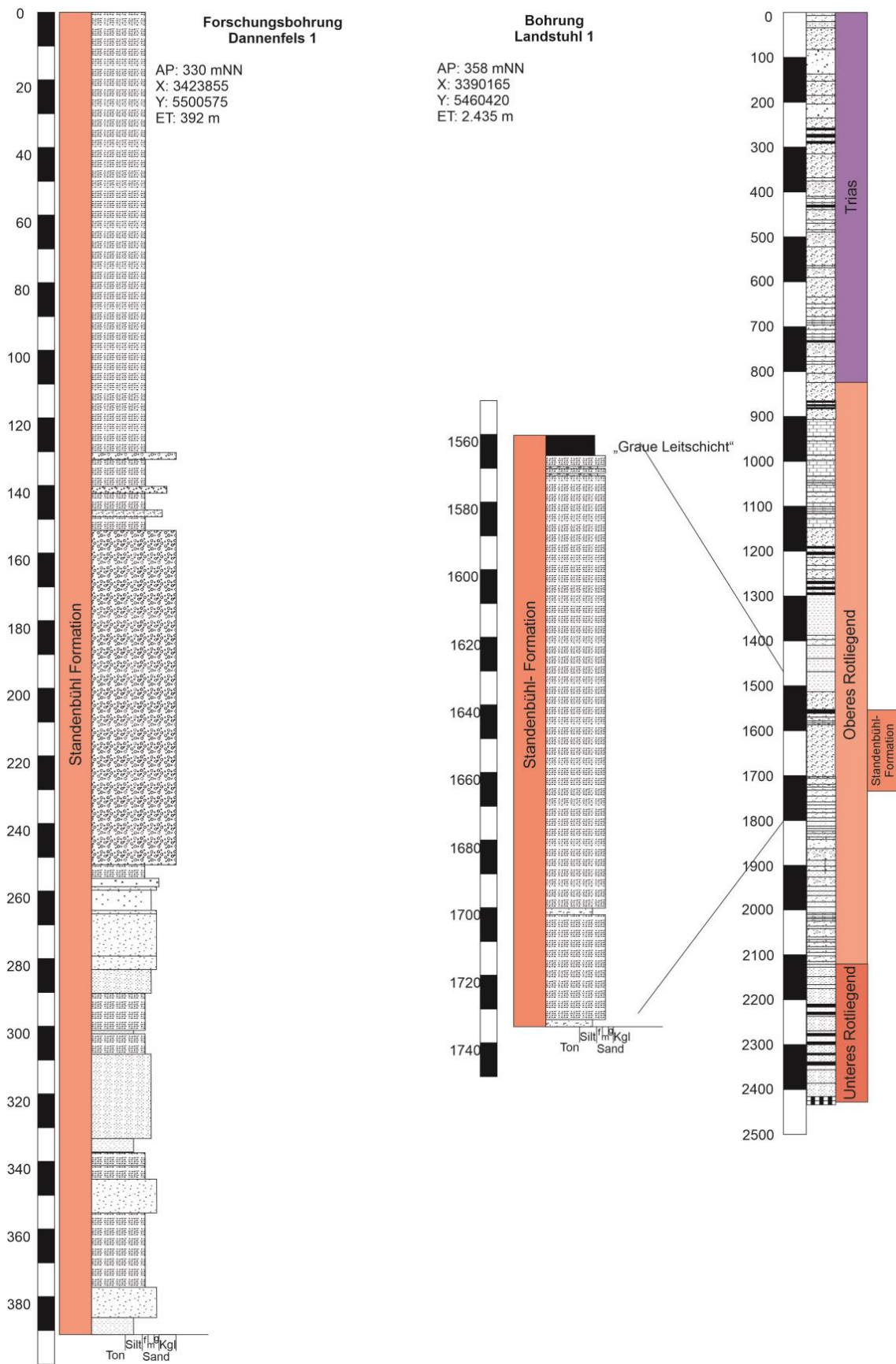


Abbildung 53: Standardprofil Forschungsbohrung Dannenfels 1 und Bohrung Landstuhl 1. Maßstabsbalken zeigen die Tiefe (MD) in Meter.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 (StandAG)

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammensetzung sowie der dadurch bedingten Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen.

Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von (Hoth et al. 2007) (DokID_11844870_01, 6846) herangezogen werden (Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle). Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten (Hoth et al. 2007) bestätigen. Lithotypen, denen Tonanteile größer als 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die diese Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. In Wechselfolgen sind Tongehalte generell kleiner 60 % und erfüllen nicht die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit. Schichten unterschiedlicher Lithologie, die erhebliche Anteile an Siltstein enthalten erfüllen nicht die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit.

Mächtige Sandsteinbänke sowie mehrere Zehner Meter mächtige siltig-feinsandige Einheiten dominieren die Abfolgen der Meisenheim-Fm. Aufgrund des erheblichen Anteils an Silt- sowie Sandstein, ist davon auszugehen, dass die Meisenheim-Fm. die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ **nicht erfüllt**.

Da die Standenbühl-Formation von Sand- und Siltstein dominiert (Boy et al. 2012) wird, ist die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ **nicht erfüllt**.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Ton-Silt-bis Mergelstein-Horizonte der Meisenheim-Fm. treten untergeordnet auf und erreichen lediglich Mächtigkeit von maximal 10 m (Bohrung Münsterappel-1). Daher kann die Annahme getroffen werden, dass die Mindestanforderung *Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* der Meisenheim-Fm im Aalenium **nicht erfüllt** ist.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 (StandAG) sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort in Betracht zu ziehen, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen die Anforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG für die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit **nicht erfüllen**, kommen die Einheiten der Standenbühl-Fm. und der Meisenheim-Fm. nicht als Gebiete für einen Endlagerstandort in Betracht. Aufgrund dessen wurden keine weiteren Mindestanforderungen geprüft.

Ergebnis der Anwendung der Mindestanforderungen

Die Einheiten der Standenbühl-Fm. und der Meisenheim-Fm. kommen nicht als Gebiete für einen Endlagerstandort in Betracht, da nicht alle Mindestanforderungen erfüllt sind.

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 109 sind alle Daten aufgeführt, die neben der verwendeten Literatur als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 109: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Name des Datensatzes	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11888790	9140	AP_GD_11111111.pdf		Bohrung Landstuhl 1 (MTB 6710)
11885220	8930	6313_00053_SV_19860601.pdf		Bohrung Dannefels (MTB 6313)
11885220	8930	6313_00054_BLGP_20011017.xlsx		Bohrung Ruppertsecken (MTB 6313)
11881514	9108	402054700101_SV.pdf		Bohrung Meisenheim (MTB 6212)

1.3.3 Buntsandstein, Calvörde-Fm. – Thüringen, Sachsen-Anhalt

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Calvörde-Formation (Unterer Buntsandstein), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet Thüringen und Sachsen-Anhalt.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt durch die Standortauswahl mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte und die Ergebnisse erläutert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Thüringen und Sachsen-Anhalt, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.2 BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Buntsandstein, Calvörde-Fm.

Der Untere Buntsandstein wird in die Calvörde-Formation und die überlagernde Bernburg-Formation untergliedert (Lepper et al. 2013). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 BGE 2020j) werden in Thüringen und Sachsen-Anhalt die Calvörde-Fm. betrachtet. Eine Zusammenfassung über die stratigraphischen Einheiten des Buntsandstein und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Thüringens (vgl. Kapitel 5) und Sachsen-Anhalts (vgl. Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Calvörde-Fm. ist nahezu flächendeckend in Sachsen-Anhalt vorhanden, z. B. in der nördlichen Altmark, auf der Calvörde-Scholle, in der Subherzyn-Mulde sowie im südöstlichen Harzvorland (Bachmann et al. 2008). Der im südlichen Thüringen nur schlecht untergliedbare Unterere Buntstandstein quert den Thüringer Wald und ist zunehmend im Thüringer Becken verbreitet (Puff & Radzinski 2013).

Fazies/Ablagerungsraum

Der Buntsandstein (Germanischer Fazies) ist im Mitteleuropäischen Becken erhalten. Zu dem südlichen Randgebiet des Beckens zählt die von der Spessart- und der Eichsfeld-Altmark-Schwelle im Westen sowie dem Böhmisches Massiv im Osten eingefasste Thüringen-Westbrandenburg-Senke, zu der auch große Teile von Thüringen und Sachsen-Anhalt zählen (Röhling & Lepper 2013).

Lithologie

Bei der Inventarisierung von Tongesteinen wurde der Untere Buntsandstein (Calvörde-Formation) in Thüringen und Sachsen-Anhalt ausgewiesen. Im Beckenzentrum sind Schluff- und Tonsteine beschrieben, die wechselnd feinsandig sind und in Sand-Ton-Mischgesteine übergehen (Lepper et al. 2013).

Mächtigkeit

Mächtigkeiten schwanken im Norddeutschen Becken zwischen 135 und 190 m, wobei in Sachsen-Anhalt eine Mächtigkeit von bis zu 175 m erreicht wird (Bachmann et al. 2008). In der Thüringischen Senke sind Mächtigkeiten zwischen 100 und 160 m bekannt (Lepper et al. 2013).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 110). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 110: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	TH	TLUG	11840020/912	.pl/.ts	INFLUINS	3D-Modell Thüringer Becken
2	DE	BKG	11875056/7728	.shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
3	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Gelände-Modell
4	TH	TLUG	11844858_01/935	.mdb	BGE_Anfrage_Bohrungen	Bohrdatenbank
5	ST	TEK_GI	11884687/8927	.xls	ST_11884687_8927.xlsx	Zusammenfassung der gelieferten Schichten-verzeichnisse

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
9	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Norddeutschland_West	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)

Eigenrecherche

Es wurden keine weiteren Daten (z. B. thematische Karten) verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

Zur Bewertung der lithologischen Eigenschaften wurden die Daten aus Tabelle 110 und zusätzliche Studien (Bachmann et al. 2008; Puff & Radzinski 2013) herangezogen. In Thüringen sowie in Sachsen-Anhalt besteht nach Auswertung der Literaturangaben kein weiterer Bedarf einer kartenbasierten Analyse der Calvörde-Formation im Hinblick auf die Erfüllung der Mindestanforderungen, weshalb von einer detaillierten 2D- und 3D-Bearbeitung der Calvörde-Fm. abgesehen wurde (siehe Bewertung der Mindestanforderungen im Kapitel 0).

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das Grundmodell INFLUINS (Verbundprojekt „Integrierte Fluidynamik in Sedimentbecken“) wurde an der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) in den Jahren 2010 bis 2014 entwickelt. Es deckt das Thüringer Becken ab, welches Teile von Thüringen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt sowie Hessen umfasst und enthält 14 modellierte Horizonte vom Grundgebirge bis zum Känozoikum.

Für die Gebiete südlich des Thüringer Waldes und weite Teile Sachsens-Anhalts lag zum Zeitpunkt der Bearbeitung kein 3D-Modell vor.

2D-Bearbeitung

Um die nach StandAG geforderten Gebirgsdurchlässigkeiten zu prüfen, wurden lithologische Beschreibungen der Calvörde-Formation Thüringens und Sachsens-Anhalts auf Grundlage von Literatur- und gelieferten Bohrungsdaten gesichtet, um eine Einschätzung der Formationen als für die Endlagerung geeignetes Tongestein zu ermöglichen. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Recherche sind im Folgenden zusammengefasst.

Ein deutlicher kleinzyklischer Aufbau mit Kornverfeinerung nach Oben zeichnet sich in den Ablagerungen der Calvörde-Fm. im gesamten Norddeutschen Becken und den angrenzenden südlichen Randgebieten ab. Die Kleinzyklen sind durch markante horizontbeständige Sandschüttungen an der Basis der Zyklen geprägt und gut über nahezu das gesamte Becken zu korrelieren (Lepper et al. 2013). Daher können folgende Kleinzyklen zusammengefasst werden: „sandig-tonige Basisschichten“ (Kleinzyklen 1 und 2), „oolithische Sandstein-Tonstein-Wechselfolge“ (Kleinzyklen 3 und 4), „Oolithschichten“ (Kleinzyklen 5 bis 7) sowie „sandig-oolithische Tonsteinschichten“ (Kleinzyklen 8 bis 10) (Lepper et al. 2013). In der Thüringer Senke sind die sandigen Basisglieder im unteren Teil. ausgeprägter als im oberen Teil der Calvörde-Fm., wo die tonig-siltigen Zyklenabschlüsse dominieren (Puff & Radzinski 2013).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994)). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden (Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle). Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen. Jedoch weisen Hoth et al. (2007) darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. In Jahn et al. (2016) sind Durchlässigkeitswerte (k_f -Wert) für den Opalinuston aufgelistet, die durch Packertests in Bohrungen an zwei schweizerischen Lokalisationen (Mont Terri und Bohrung Benken) ermittelt wurden, und alle Werte liegen im Bereich oder unterhalb von 10^{-12} m/s.

Die Calförde-Fm. wird als siltig-tonige Wechselfolge beschrieben (Lepper et al. 2013), in der an wiederkehrenden Abfolgen basale Sandsteine charakteristisch sind. In Wechselfolgen, die nicht ausschließlich aus Ton- und Siltstein bestehen sind nach Hoth et al. (2007) Tonanteile generell kleiner 60 % und erfüllen nicht die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit. Daher ist davon auszugehen, dass die Calvörde-Fm. in der Region Sachsen-Anhalt und Thüringen die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ **nicht erfüllt**.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen die Anforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG für die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit **nicht erfüllen**, kommen die Einheiten der Callvörde-Fm. nicht als Gebiete für einen Endlagerstandort in Betracht. Aufgrund dessen wurden keine weiteren Mindestanforderungen geprüft.

Ergebnis

Im Rahmen der Bearbeitung wurden alle Gebiete ausgeschlossen, welche ein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die zusätzlich alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen nicht alle Mindestanforderungen erfüllen, werden für die Gesteine des Unteren Buntsandstein keine Gebiete in Sachsen-Anhalt und Thüringen ausgewiesen.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 111 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 111: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11840020	912		INFLUINS		3D-Modell Thüringer Becken

1.3.4 Buntsandstein, Röt-Fm. – Hessen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Röt (Oberer Buntsandstein), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Hessen (HE).

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Röt erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse dargestellt. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Hessen, die die Mindestanforderungen erfüllen. In Hessen konnten im Oberen Buntsandstein keine Gebiete ermittelt werden, die die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfüllen.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Trias, Oberer Buntsandstein (Röt)

Der Buntsandstein kann in folgende Stufen untergliedert werden: Indusium, Olenekium und der basale Teil des Anisium. Alle Stufen sind in Hessen unter Überdeckung von jüngeren Ablagerungen verbreitet. Als Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 in BGE 2020j) werden in Hessen die Stufen des Oberer Buntsandstein (Röt) betrachtet. Die Röt-Formation stellt die letzte Folge (s7) der insgesamt 7 Folgen des Buntsandstein dar (Perm-Trias Subkommission der deutschen stratigraphischen Kommission 2016) und lässt sich wiederum in 4 Unterfolgen bzw. Subformationen, Röt 1–4, darstellen (Hinze 1967). Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Buntsandstein und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Hessen (vgl. Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die Gesteine des Oberen Buntsandstein, speziell die Röt-Formation, sind in Hessen über das gesamte östliche Landesgebiet verbreitet (Dersch-Hansmann et al. 2013). Große Mächtigkeiten erreicht der Buntsandstein v. a. in der hessischen Senke und im hessischen Teil des Werra-Fulda-Beckens.

Fazies/Ablagerungsraum

Während der Zeit des Oberen Buntsandstein veränderte sich der Ablagerungsraum gegenüber dem Mittleren Buntsandstein in Hessen. Der Mittlere Buntsandstein in der hessischen Senke war durch fluviatilen Eintrag geprägt (Dersch-Hansmann et al. 2013).

Dies änderte sich im Oberen Buntsandstein. Zu jener Zeit wurden im Zentralbereich der Hessischen Senke Sedimente einer marin-evaporitischen Fazies abgelagert (Dersch-Hansmann et al. 2013). In Richtung Süden zunehmend, ändert sich die Ablagerungsfazies von marin-evaporitisch zu einer breiten Sabkha und den dazugehörigen Ablagerungen. In Randgebieten dieser Sabkhafazies, v. a. gegen Süden, werden Deltaschüttungen und fluviatile Sande häufiger (Dersch-Hansmann et al. 2013).

Lithologie

Die Röt-Formation, die den gesamten Oberen Buntsandstein und den basalen Teil des Anisium einnimmt, lässt sich in vier Subformationen gliedern:

Röt 1-Subformation, bis ungefähr 40 m mächtig (Dersch-Hansmann et al. 2013): Ton-, Silt-, Feinsand- und Mergelsteine mit z.T. dünnenschichtigen Gipssteinen bzw. Ton-Gips-Mischgesteine oder Karbonaten.

Röt 2-Subformation, bis ungefähr 70 m mächtig (Dersch-Hansmann et al. 2013): rot bis rotviolette Ton-, Silt- und Mergelsteine mit Einschaltungen von siltreichen Sandsteinen und Dolomiten.

Röt 3-Subformation, bis 50 m mächtig (Dersch-Hansmann et al. 2013): intensiv rotbraune, nahezu ungeschichtete Ton- und Siltsteine mit seltenem Auftreten von Sulfaten; oftmals Einschaltungen quarzitisches zementierter Sandsteine.

Röt 4-Subformation, bis 96 m mächtig (Dersch-Hansmann et al. 2013): farblich stark differenzierte Ton- und Silt-Mergelsteine mit teilweise hohen Gips-Gehalten. Außerdem treten sandreiche Siltsteine, reine Tonsteine sowie teilweise quarzitisches zementierte Feinsandsteine auf.

Mächtigkeit (Dersch-Hansmann et al. 2013)

Im Zentralteil der Hessischen Senke werden bis zu 253 m (bei Fürstenwald) Röt-Ablagerungen angetroffen. Südlich von Borken (Hessen) und in Ost-West-Verlängerung sinkt die Mächtigkeit des Oberen Buntsandstein „über kurze Distanz auf weniger als die Hälfte“ (Dersch-Hansmann et al. 2013). Im Gebiet um Bad Hersfeld, Eschwege und der Rhön erreicht die Mächtigkeit des Röt nur noch jeweils etwa 100 m, im Gebiet des Odenwaldes gar nur noch etwa 90 m.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 112). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 112: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales-Gelände- Modell
3	HE	HLNUG	11841938/ 507	pl/ts	Modell Hessen 3D	3D-Modell (Arndt & Bär 2011)

Eigenrecherche

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

- Dersch-Hansmann, M., Lepper, J., Rambow, D., Tietze, K.-W. & Wenzel, B. (2013): Der Buntsandstein in der zentralen Hessischen Senke. In: J. Lepper & H.-G. Röhling (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. Bd. 69, S. 385-419, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-49229-9
 4. Isopachenkarte der Röt-Formation
 5. Referenzprofil für den oberen Buntsandstein im Raum Nordwaldeck

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Röt (Oberer Buntsandstein) in Hessen geprüft wurde, ist in Tabelle 113 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 113: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche „Basis Buntsandstein“ aus den Topflächen Prae-Perm, Zechstein und Rotliegend	b_so_HE.ts
c) Topfläche „Oberer Buntsandstein“ erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_so_HE_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_so_HE_MACRORESULT_qs.ts
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_so_HE.dxf MG_t_so_HE.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 10_ObererBuntsandstein
g) Import der Fläche aus 2h) als DXF in ArcGIS Pro	
h) Separieren der Fläche in Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Trennen“	HE_so_basis_MA.shp
i) Entfernen aller Flächen mit einer Fläche kleiner als 10 km ² und Benennung der Gebiete	HE_Tongestein_so_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 113 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische 3D-Modell ist das Hessen3D-Modell des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLUNG) (Arndt & Bär 2011), welches aus der Projektarbeit „3D-Modell der geothermischen Tiefenpotentiale von Hessen“

der Technischen Universität Darmstadt entstanden ist. Es bildet die komplette Fläche des Bundeslandes Hessen ab und beinhaltet Isothermen (60 °C, 100 °C, 120 °C und 150 °C), Störungsflächen (s_geologie_Stoerungen) sowie insgesamt 6 Topflächen von folgenden stratigraphischen Einheiten:

- s_geologie_QuartaerTertiaer = Quartär und/oder Tertiär
- s_geologie_MuschelkalkKeuper = Muschelkalk und/oder Keuper
- s_geologie_Buntsandstein = Buntsandstein
- s_geologie_Zechstein = Zechstein
- s_geologie_Rotliegend = Rotliegend
- s_geologie_PraePerm = Alle Gesteine älter als Perm

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 113 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Da das Hessen3D Eingangsmodell als Topflächenmodell kreiert wurde, wurde zuerst aus den Topflächen des PraePerm, Rotliegend und Zechstein eine Bearbeitungsfläche „Basis Buntsandstein“ erstellt. Bei Überlagerung der drei Topflächen wurde jeweils die stratigraphisch höhere verwendet und am Ende wurde die neu erstellte Bearbeitungsfläche auf die Verbreitung der Topfläche Buntsandstein zugeschnitten (Tabelle 113, 2b).

Das digitale Geländemodell für Hessen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 113, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Bereiche, in denen Ober- und Unterkante der Einheit tiefer als 1500 m u. GOK liegen, werden so durch eine Null-Mächtigkeit gelöscht; in Bereichen, in denen nur die Unterkante tiefer als 1500 m u. GOK liegt, wird die Mächtigkeit zwischen 1500 m u. GOK und der Oberkante berechnet. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 113, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Basis Buntsandstein und der Topfläche berechnet (Tabelle 113, 2f). Die Topfläche setzt sich aus der Topfläche Buntsandstein sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 113, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 113, 2g). Des Weiteren wurden im Bereich von Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können.

Die Bearbeitungsfläche Basis Buntsandstein wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 113, 2h).

2D-Bearbeitung

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der gesamte Datensatz in einzelne Flächen getrennt (Tabelle 113, 3b), sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft werden konnte. Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt (Tabelle 113, 3c), mit Ausnahme von Gebieten, die an der Grenze zu Bayern, Thüringen oder Niedersachsen liegen und dort fortgeführt werden.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011; Dersch-Hansmann et al. 2013) herangezogen, um die lithologische Beschaffenheit näher zu ermitteln.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammensetzung sowie der dadurch bedingten Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden (Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle). Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen.

Wie aus der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) und den betrachteten Studien (Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011; Dersch-Hansmann et al. 2013) zu entnehmen, sind die Tongesteinsformationen des Röt (Oberer Buntsandstein) teilweise sehr inhomogen aufgebaut. Neben Ton-, Silt- und Mergelsteinen, die dominant vorliegen, enthalten die Formationen Einschaltungen von z. B. Sulfatgesteinen oder Feinsandsteinen. Die Vielzahl an Einschaltungen haben einen negativen Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit.

Ebenfalls negativ wirken sich die unterschiedliche Mineralzusammensetzung der Einschaltung aus. Klastische Sedimente, Sulfate und Karbonate reagieren alle unterschiedlich auf Kontakt mit Wässern. Eine regionale Korrelation und Abschätzung von Gebieten die lithologisch geeignet wären, ist bei Ablagerungen in einem kontinentalen-evaporitischen Ablagerungsraum schwer durchzuführen.

Es kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass sich in den heterogenen Abfolgen des Oberen Buntsandstein Gebiete befinden, die ausreichend mächtiges, homogenes Tongestein enthalten. Insgesamt ist jedoch davon auszugehen, dass die Formationen des Oberen Buntsandstein nicht den nötigen Tonanteil aufweisen oder die lithologischen Wechsel und die damit einhergehende Heterogenität zu ausgeprägt ist, um die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit zu erfüllen.

Der hohe Gehalt an unterschiedlichen Einschaltungen sowie die geringe Gesamtmächtigkeit des Röt lassen es zweifelhaft erscheinen, ob ein 100 m mächtiges Gesteinspaket definiert werden kann, welches eine Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-10} m/s erfüllt. Daher kann die Annahme getroffen werden, dass die Abfolge des Röt in Hessen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit **nicht erfüllt**.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Oberen Buntsandstein wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Oberen Buntsandstein zusammen.

Die Verbreitungsfläche des Oberen Buntsandstein wurde mit der 100 m-Mächtigkeitslinie aus verschnitten. Daher wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ in dem verbleibenden Gebiet als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Oberen Buntsandstein wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als zunächst **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden.

Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort in Betracht zu ziehen, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen die Anforderung nach § 23 Abs. 5 StandAG für die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit nicht erfüllen, werden für die Gesteine des Oberen Buntsandstein keine Gebiete in Hessen ausgewiesen.

Ergebnis

Im Rahmen der Bearbeitung wurden alle Gebiete ausgeschlossen, welche ein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die zusätzlich alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen nicht alle Mindestanforderungen erfüllen, werden für die Gesteine des Oberen Buntsandstein keine Gebiete in Hessen ausgewiesen.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 114 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 114: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11841938	507				3D-Modell (Arndt & Bär 2011)

1.3.5 Keuper – Niedersachsen, Bremen, Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Keuper, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet des Keuper in Niedersachsen, Hamburg und Bremen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Keuper erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse dargestellt. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, Hamburg und Bremen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Geographische Verbreitung

Der Keuper ist in Niedersachsen, Hamburg und Bremen flächendeckend vorhanden. Größtenteils liegen die Vorkommen unter Bedeckung von mehr als 1000 m mächtigen Sedimentschichten (Doornenbal & Stevenson 2010). Nur im Süden von Niedersachsen finden sich Gebiete, in denen die Gesteine des Keuper an der Oberfläche anstehen.

Stratigraphie

Der Keuper stellt die jüngste Gruppe der Trias dar und kann in den Unteren, Mittleren und Oberen Keuper unterteilt werden. Der Untere Keuper wird im Niedersächsischen Becken durch die Erfurt-Formation repräsentiert. Daran schließen sich im Mittleren Keuper (vom Älteren zum Jüngeren) die Grabfeld-, Stuttgart-, Weser- und Arnstadt-Formation an. Die Exter-Formation wird dem Oberen Keuper zugeordnet. Eine tabellarische Übersicht der Einheiten des Keuper mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der zuvor erstellten Inventarisierungstabelle Niedersachsen zu finden (vgl. Kapitel 5).

Lithologie (Beutler & Tessin 2005; Farrenschon 2005; Nitsch et al. 2011a, 2011b, 2011c)

Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 in BGE 2020j) werden für den Keuper die Grabfeld-, die Weser- und die Exter-Formation als mögliche Tongesteinsformationen betrachtet. Die Grabfeld-Formation ist zwar insgesamt eher inhomogen, wird aber für das Weser-Bergland und Osnabrücker Bergland als Abfolge aus Ton- und Mergelsteinen beschrieben und daher zunächst berücksichtigt. Die weiteren Einheiten des Keuper (Erfurt-, Stuttgart- und Arnstadt-Formation) erfüllen aufgrund ihrer Heterogenität nicht die Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit.

Die zyklische Pelit-Evaporit Abfolge der Grabfeld-Formation (Unterer Gipskeuper) zeigt einen feinschichtigen Wechsel von Tonsteinen, Dolomitsteinmergeln und Gipsen. Nördlich wird eine sulfatärmere Ton-Steinsalz-Fazies mit Knollenanhydrit angetroffen. In der halitführenden Fazies treten zudem häufig Tongestein-Steinsalz-Wechselagerungen, zum Teil mit Sulfaten, auf. Im Osnabrücker und Weser-Bergland besteht die Grabfeld-Formation aus einer Abfolge von Ton- und Mergelsteinen.

Die Weser-Formation (Oberer Gipskeuper) besteht aus rotbunten und grünen dolomitischen Tonsteinen und Tonmergelsteinen, die meist Sulfatknollen und dünne Dolomitbänke enthalten. In mehreren Horizonten finden sich Einschaltung von knolligen, teilweise auch geschichteten Sulfatbänken mit erheblicher Mächtigkeit. In der Norddeutschen Senke sind drei Steinsalzlager ausgebildet.

Die Exter-Formation (Rhätkeuper) enthält dominant Tonstein. Es sind drei bis vier Sandsteinhorizonte mit untergeordneten Karbonaten zwischengeschaltet.

Mächtigkeit (Beutler & Tessin 2005; Farrenschon 2005; Nitsch et al. 2011a, 2011b, 2011c)

Die mittlere Mächtigkeit der Grabfeld-Formation beträgt 100 – 300 m. Die Weser-Formation ist in der Norddeutschen Senke bis über 200 m, im Weser- und Osnabrücker Bergland jedoch nur 40 – 70 m mächtig. Beide Formationen erreichen ihre maximale Mächtigkeit im Glückstadt-Graben in Schleswig-Holstein (2700 m bzw. 4500 m). Die durchschnittliche Mächtigkeit der Exter-Formation beträgt 100 m bis 150 m, während lokal Mächtigkeiten von bis zu 250 m auftreten können.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 115). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N/ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 115: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Daten-format	Dateiname	Beschreibung
1	NI	LBEG	11842295/ 7775	ts	BGE-GTA3D	3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Baldschuh et al. 2001; Müller et al. 2016)
2	HH	BUE	11880284/8 434	ASCII/ts	Tiefenmodell Hamburg	3D-Modell von Hamburg mit 2 Basis- und 1 Topfläche
3	DE	BKG	11865482/8 853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Gelände-modell
4	DE	BKG	11875056/7 728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Bundesländergrenzen inkl. 12-See-meilen-Zone
5	DE	BGR	11844870_0 1/6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
6	DE	BGR	2385810/89 06	mdb	Norddeutschland_West	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
7	DE		11881514	mdb	Bohr_prg (+ Daten)	Daten der Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 115 genannten Daten wurden für die Anwendung der Mindestanforderungen die Berichte der Studien „Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland“ (Reinhold et al. 2011) und „Endlagerstandortmodell NORD (AnSichT)“ (Reinhold et al. 2013) herangezogen. Aus diesen Berichten wurde die Beschreibung der Sedimente des Keuper und die dort getroffene Einschätzung zur Eignung als Barrierekomplex bzw. im Hinblick auf ein Endlagerstandortmodell verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Keuper in Niedersachsen, Hamburg und Bremen geprüft wurde,

ist in Tabelle 116 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt. Hamburg und Bremen sind in dem für Niedersachsen verwendeten Modell enthalten, weshalb alle drei Bundesländer gemeinsam bearbeitet wurden. Das 3D-Modell Niedersachsen (einschließlich Hamburg und Bremen) beinhaltet die Basishorizonte Keuper und Lias. Demnach bezieht sich die Prüfung der Mindestanforderungen Tiefe und Mächtigkeit aus dem 3D-Modell auf die gesamte stratigraphische Einheit des Keuper. Die Prüfung der Mindestanforderungen auf Formationsebene wurde stichprobenartig an einzelnen Bohrungen durchgeführt.

Tabelle 116: Vorgehensweise zur Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Keuper aus der Basisfläche Keuper (aus allen Kacheln)	b_Keuper_NI.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Keuper_NI_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Keuper_NI_MACRORESULT_qs.ts
3. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 09_MittlererKeuper

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	NI_k_basis_MA.shp
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	NI_Tongestein_Keuper_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 116 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell basiert auf den Daten des Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = Digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tp1 = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein

- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg ab, sowie weite Teile von Niedersachsen bis auf den südlichen Bereich ab Höhe Göttingen.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 116 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2 a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell (Tabelle 116, 2g).

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen Kachel-weise (in Kartenblätter unterteilt) vor. Daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Keuper-Basisflächen (13_k) erzeugt (Tabelle 116, 2b). Allerdings treten an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermaschung) auf.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 116, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 116, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 116, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Keuper und der Topfläche berechnet (Tabelle 116, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen zwischen Lias und Mittelmiozän bis Pliozän sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 116, 2f).

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Maechtigkeit“ und „Tiefenlage“ m u GOK überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert (Tabelle 116, 2g). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, wurden gelöscht.

Die Bearbeitungsfläche Keuper wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben.

2D-Bearbeitung

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der gesamte Datensatz in einzelne Flächen getrennt, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft werden konnte (Tabelle 116, 3a). Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² (BT-Drs. 18/11398) wurden entfernt, mit Ausnahme von Gebieten, die an der Grenze zu Nordrhein-Westfalen oder Schleswig-Holstein liegen und dort fortgeführt werden (Tabelle 116, 3b). Da Hamburg und Bremen gemeinsam mit Niedersachsen bearbeitet wurden, gehen die entsprechenden Gebiete dort über die Bundeslandgrenzen hinweg.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2013; Reinhold et al. 2011) herangezogen und Bohrdaten, unter anderem Schichtenverzeichnisse und Gamma Ray Logs, stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Mittleren und Oberen Keuper geprüft (vgl. Tabelle 117).

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von (Hoth et al. 2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt ist. Die kumulative Mächtigkeit fasst dabei Schichtpakete innerhalb des Keuper zusammen, sofern diese eine einheitliche Einstufung bezüglich der Gebirgsdurchlässigkeit zulassen.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007, DokID_11844870_01, 6846) herangezogen werden (Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle). Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen.

Lithologisch werden die Weser-, die Grabfeld- und die Exter-Formation in der Literatur allgemein als tonige Abfolgen beschrieben (z. B. Beutler & Tessin 2005; Farrenschon 2005; Nitsch et al. 2011a, 2011b, 2011c). Bei genauerer Betrachtung von Literatur sowie zusätzlichen Studien und Bohrdaten (Schichtenverzeichnisse, Bohrprofile und Gamma Ray Logs, siehe auch Tabelle 116 und Tabelle 117) sind diese Abfolgen lithologisch

jedoch sehr heterogen ausgebildet und weisen regional starke Unterschiede auf. Generell werden die Abfolgen der Grabfeld- und der Weser-Formation von Tongesteinen und Tonmergeln dominiert, die zum Teil erheblich Karbonat- sowie Psammitische-Anteile enthalten. Einschaltungen von Sulfatlagen sind sehr häufig. In der Exter-Formation treten zusätzlich Sandstein-Horizonte auf, welche die Gebirgsdurchlässigkeit deutlich erhöhen.

Es kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass sich in den heterogenen Abfolgen des Mittleren Keuper Gebiete befinden, die ausreichend mächtiges, homogenes Tongestein enthalten. Insgesamt ist jedoch davon auszugehen, dass die Formationen des Keuper nicht den nötigen Tonanteil aufweisen oder die lithologischen Wechsel und die damit einhergehende Heterogenität zu ausgeprägt ist, um die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit zu erfüllen.

Für die Einschätzung der Eignung der Formationen des Keuper wurden zusätzlich Studien hinzugezogen, die sich mit der Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf verschiedene Aspekte beschäftigen. Dabei sind die Studien „Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland“ (Reinhold et al. 2011) und „Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007) zu erwähnen. Diese ziehen Einheiten des Keuper ebenfalls nicht in Betracht.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Mittleren Keuper in Niedersachsen **nicht erfüllt** ist.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort in Betracht zu ziehen, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen die Anforderung nach § 23 Abs. 5 StandAG für die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit nicht erfüllen, werden für die Gesteine des Keuper keine Gebiete in Niedersachsen, Hamburg und Bremen ausgewiesen.

Ergebnis

Im Rahmen der Bearbeitung wurden alle Gebiete ausgeschlossen, welche ein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die zusätzlich alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen nicht alle Mindestanforderungen erfüllen, werden für die Gesteine des Keuper keine Gebiete in Niedersachsen, Hamburg und Bremen ausgewiesen.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 117 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist in Kapitel 7 zu finden.

Tabelle 117: Übersicht über die entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei-gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11842295	7775		BGE-GTA3D		3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen
11881514	9108	2452084, 2434120	05904970013 1_SV.pdf, LAUE_Z1____ _030841011_ ED .LAS	Schichtenverzeichnis Lauenau Z1	Bohrung aus Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank
11881514	9108	2452083	05901960013 1_SV.pdf	Schichtenverzeichnis Eldagsen Z1	Bohrung aus Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank
11881514	9108	2451902, 2433513	05668080040 1_SV.pdf, Stemmerberg- R1.las	Schichtenverzeichnisse Stemmerberg 4 und Stemmerberg R1	Bohrung aus Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank
11881514	9108	2451955	05745030013 1_SV.pdf	Schichtenverzeichnis Lehrte Z1	Bohrung aus Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank
11884574	8906	2385811	Norddeutschland_West.mdb	Schichtenverzeichnisse Krummendeich 1/1939, Linsburg Z1/1961, Barwedel 1/1978, Remlingen 5/1983, Lehrte 11/1951	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)

1.3.6 Keuper – Schleswig-Holstein

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Keuper, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet des Keuper in Schleswig-Holstein.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Keuper erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse dargestellt. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Schleswig-Holstein, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Der Keuper stellt die jüngste Gruppe der Trias dar und kann in den Unteren, Mittleren und Oberen Keuper unterteilt werden. Der Untere Keuper wird im Niedersächsischen Becken durch die Erfurt-Formation repräsentiert. Daran schließen sich im Mittleren Keuper (vom Älteren zum Jüngeren) die Grabfeld-, Stuttgart-, Weser- und Arnstadt-Formation an. Die Exter-Formation wird dem Oberen Keuper zugeordnet.

Eine tabellarische Übersicht der Einheiten des Keuper mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der zuvor erstellten Inventarisierungstabelle Schleswig-Holstein (vgl. Kapitel 5) zu finden.

Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 in BGE 2020j) werden für den Keuper in Schleswig-Holstein die Weser-Formation und die Exter-Formation betrachtet. Die weiteren Einheiten des Keuper (Erfurt-, Grabfeld-, Stuttgart- und Arnstadt-Formation) erfüllen aufgrund ihrer Heterogenität nicht die Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit.

Geographische Verbreitung

Der Keuper ist in Schleswig-Holstein flächendeckend vorhanden. Die Vorkommen liegen unter Bedeckung von zum Teil mächtigen Sedimentschichten.

Lithologie (Beutler & Nitsch 2005; Nitsch et al. 2011a, 2011c)

Die Weser-Formation (Oberer Gipskeuper) besteht aus rotbunten und grünen dolomitischen Tonsteinen und Tonmergelsteinen, die meist Sulfatknollen und dünne Dolomitbänke enthalten. In mehreren Horizonten finden sich Einschaltung von knolligen, teilweise auch geschichteten Sulfatbänken mit erheblicher Mächtigkeit. In der Norddeutschen Senke sind drei Steinsalzlager ausgebildet.

In der Exter-Formation dominiert Tonstein. Es sind drei bis vier Sandsteinhorizonte und untergeordnet Karbonate eingeschaltet.

Mächtigkeit (Beutler & Nitsch 2005; Nitsch et al. 2011a, 2011c)

Die Weser-Formation ist in der Norddeutschen Senke bis über 200 m mächtig und erreicht ihre maximale Mächtigkeit im Glückstadt-Graben mit 4500 m. Die Exter-Formation ist im Mittel etwa 100 m bis 150 m und im Glückstadt-Graben bis 600 m mächtig.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 118). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 118: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	SH	LLUR	11874951/7723	pl/ts	Strukturmodell-StörTief	3D-Modell (Thomsen et al. 2017)
2	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Bundesländergrenzen
3	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM200	Digitales Geländemodell
4	DE	BGR	11844870_01/6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	BGR-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
5	DE	BGR	11884574/8906	mdb	Norddeutschland_West	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
6	SH	LLUR	11881390	mdb	Bohr_prg (+ Daten)	Daten der Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 118 genannten Daten wurden für die Anwendung der Mindestanforderungen die Berichte der Studien „Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland“ (Reinhold et al. 2011) und „Endlagerstandortmodell NORD (AnSichT)“ (Reinhold et al. 2013) verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Keuper in Schleswig-Holstein geprüft wurde, ist in Tabelle 119 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 119: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Keuper aus der Basisfläche Keuper	b_Keuper_SH.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Keuper_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Keuper_MACRORESULT_qs.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_k_SH.dxf MG_t_k_SH.txt
3. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 09_MittlererKeuper
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	SH_k_basis_final.shp
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	SH_Tongestein_Keuper_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 119 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das StörTief-Modell ist ein geologisches 3D-Modell des Geologischen Dienstes Schleswig-Holstein (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, LLUR) aus dem Jahr 2017 (Thomsen et al. 2017). Zur Bearbeitung des Modells wurden Daten des Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland (Baldschuhn et al. 2001) und zusätzlich bekannte Tiefbohrungen verwendet. Modellierte Störungsflächen bilden hauptsächlich tiefreichende Störungssysteme ab. Scheitelstörungen über Salzstrukturen wurden nicht modelliert. Das Modell deckte die komplette Landfläche des Bundeslandes Schleswig-Holstein ab, reicht auch in die Gebiete der Ost- und Nordsee. Die 12-Seemeilen-Zone ist jedoch nicht in Gänze Teil des Modellumfanges, ebenso wenig wie Helgoland. Folgende Flächen wurden hauptsächlich als Basisflächen modelliert:

- StM_00_Topographie: Geländeoberfläche
- StM_01_Basis_TpaO: Oberes Paläozän
- StM_02_Basis_KrO: Obere Kreide
- StM_03_Basis_KrU: Untere Kreide
- StM_04_Basis_JO: Oberer Jura
- StM_05_Basis_JM: Mittlerer Jura
- StM_06_Basis_JU: Unterer Jura
- StM_07_Basis_KO: Oberer Keuper

- StM_08_Basis_K: Keuper
- StM_09_Basis_SO: Oberer Buntsandstein
- StM_10_Basis_SM: Mittlerer Buntsandstein
- StM_11_Basis_SU: Unterer Buntsandstein
- StM_12_Basis_Z: Zechstein
- StM_Salzdiapire: Hüllflächen der Salzstrukturen
- StM_Stoerungen: Störungsfächen

Das StörTief-Modell wurde dem ebenfalls vorhandenem Basismodell („Basismodell SH“) vorgezogen, da in den Nord- und Ostseebereichen keine Keupersalinare erwarten werden. Das StörTief-Modell beinhaltet als Topfläche des Keuper die Grenzfläche zum Oberen Keuper und nicht wie das 3D Basismodell die Grenzfläche zum Unteren Jura. Da die Keupersalinare im Unteren bzw. Mittleren Keuper auftreten, kann das StörTief-Modell dieses stratigraphische Paket genauer darstellen.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 119 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Aus der Basisfläche Keuper des StörTief-Modells wurde die Bearbeitungsfläche Keuper generiert.

Das digitale Geländemodell für Schleswig-Holstein wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 119, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 119, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 119, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Keuper und der Topfläche berechnet (Tabelle 119, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Oberen Keuper sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 119, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet,

dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 119, 2g). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profileschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Keuper wird anschließend als DXF-Datei und ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 119, 2h).

2D-Bearbeitung

Die aus dem 3D-Modell resultierende Fläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde die Gesamtfläche in einzelne Flächen getrennt, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft werden konnte (Tabelle 119, 3a). Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt, mit Ausnahme von Gebieten, die an der Grenze zu Niedersachsen oder Hamburg liegen und dort fortgeführt werden (Tabelle 119 3b).

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011; Reinhold et al. 2013) herangezogen und Bohrdaten, hauptsächlich Schichtenverzeichnisse und Gamma Ray Logs, (siehe **Ergebnis**) und der Bohrdatenbank der Tonstudie (Hoth et al. 2007) stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Mittleren und Oberen Keuper geprüft.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von (Hoth et al. 2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt ist.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007, DokID_11844870_01, 6846) herangezogen werden (Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle). Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen.

Lithologisch werden die Weser- und die Exter-Formation in der Literatur allgemein als tonige Abfolgen beschrieben (z. B. Beutler & Nitsch 2005; Nitsch et al. 2011a, 2011c). Bei genauerer Betrachtung sind diese Abfolgen lithologisch jedoch sehr heterogen ausgebildet. Die Weser-Formation besteht hauptsächlich aus Tonsteinen und Tonmergelsteinen, führt jedoch häufig Anhydrit, Gips und Mergelstein und vereinzelt Feinsandstein, Kalkstein und Siltstein, was bei der Betrachtung von Literatur, Studien und Bohrdaten (Schichtenverzeichnisse, Gamma Ray Logs) deutlich wurde (siehe auch Tabelle 118 und Ergebnis). In der Exter-Formation sind zusätzlich Sandstein-Horizonte vorhanden, welche die Gebirgsdurchlässigkeit deutlich erhöhen. Zudem treten regional starke Unterschiede auf.

Es kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass sich in den heterogenen Abfolgen des Mittleren und Oberen Keuper Gebiete befinden, die ausreichend mächtiges, homogenes Tongestein enthalten. Insgesamt ist jedoch davon auszugehen, dass die Formationen des Keuper nicht den nötigen Tonanteil aufweisen oder die lithologischen Wechsel und die damit einhergehende Heterogenität zu stark ausgeprägt ist, um die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit zu erfüllen.

Für die Einschätzung der Eignung der Formationen des Keuper wurden zusätzlich Studien hinzugezogen, die sich mit der Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf verschiedene Aspekte beschäftigen. Dabei sind die Studien „Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland“ (Reinhold et al. 2011) und „Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007) zu erwähnen. Diese ziehen Einheiten des Keuper ebenfalls nicht in Betracht.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Mittleren und Oberen Keuper in Schleswig-Holstein **nicht erfüllt** ist.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort in Betracht zu ziehen, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen die Anforderung nach § 23 Abs. 5 StandAG für die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit nicht erfüllen, werden für die Gesteine des Keuper keine Gebiete in Schleswig-Holstein ausgewiesen.

Ergebnis

Im Rahmen der Bearbeitung wurden alle Gebiete ausgeschlossen, welche ein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die zusätzlich alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen nicht alle Mindestanforderungen erfüllen, werden für die Gesteine des Keuper keine Gebiete in Schleswig-Holstein ausgewiesen.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 120 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 120: Übersicht über die entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungser- hebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11874951	7723		Strukturmodell- StörTief		3D-Modell
11881390	8999	1613114, 1623054	300192100101_1050- 2077_SGR.tif, 300192100101_SV.pdf	Schichtenverzeichnis und Gamma Ray Log Bohrung Westerland 1	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11881390	8999	1613212, 1623058	300753000101_0270- 1300_Log.tif, 300753000101_SV.pdf	Schichtenverzeichnis und Gamma Ray Log Bohrung Maasbüll 1	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11881390	8999	1613266, 1623062	301342400121_1165- 2011_GRL_1.tif, 301342400121_SV.pdf	Schichtenverzeichnis und Gamma Ray Log Bohrung Joldelund 1T	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11881390	8999	1613364, 1623066	301792200221_1100- 1930_SGR.tif, 301792200221_SV.pdf	Schichtenverzeichnis und Gamma Ray Log Bohrung Westerhe- ver 2T	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11881390	8999	1616867, 1623433	302531600301_1225- 1414_GR.tif, 302531600301_SV.pdf	Schichtenverzeichnis und Gamma Ray Log Bohrung Hamdorf 3	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11881390	8999	1619028, 1623694	303366700131_0408- 2031_GR.tif, 303366700131_SV.pdf	Schichtenverzeichnis und Gamma Ray Log Bohrung Plön-Schön- berg Z1	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11881390	8999	1623749	303512800301_SV.pdf	Schichtenverzeichnis Bohrung Cismar 3	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungser- hebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11881390	8999	1619549, 1623750	303522400131_1180- 2606_BHC=SGR_1.tif, 303522400131_SV.pdf	Schichtenverzeichnis und Gamma Ray Log Bohrung Fehmarn Z1	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11881390	8999	1619634, 1619637, 1623762	303927000121_1006- 2558_BHC=Sonic=GR_ 1.tif, 303927000121_1120- 5694_Triassic Sec- tion.tif, 303927000121_SV.pdf	Schichtenverzeich- nis, Gamma Ray Log und Profil Bohrung Glückstadt T1	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11881390	8999	1623767	303947300301_SV.pdf	Schichtenverzeichnis Bohrung Krempe 3	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11881390	8999	1620497, 1623920	305361300121_0573- 2263_GR_2.tif, 305361300121_SV.pdf	Schichtenverzeichnis und Gamma Ray Log Bohrung Nusse T1	Bohrungen der Kohlenwasser- stoff-Bohrda- tenbank
11884574	8906	2385811	Norddeutsch- land_West.mdb	Schichtenverzeich- nisse Wulfsmoor 2, Hamdorf 2/1953, Krempe 3/1939, Peissen 5/1954, Quickborn 2/1949	Bohrungsda- ten der Ton- studie (Hoth et al. 2007)

1.3.7 Keuper – Thüringen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Keuper, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet des Keuper in Thüringen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Keuper erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse dargestellt. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Thüringen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Geographische Verbreitung

Der Keuper ist in Thüringen im Thüringer Becken und im thüringischen Grabfeld vorhanden. Die Vorkommen stehen zum größten Teil an der Oberfläche an. Nur in kleinen Gebieten liegen sie unter Bedeckung.

Stratigraphie

Der Keuper stellt die jüngste Gruppe der Trias dar und kann in den Unteren, Mittleren und Oberen Keuper unterteilt werden. Der Untere Keuper wird im Niedersächsischen Becken durch die Erfurt-Formation repräsentiert. Daran schließen sich im Mittleren Keuper (vom Älteren zum Jüngeren) die Grabfeld-, Stuttgart-, Weser- und Arnstadt-Formation an. Die Exter-Formation wird dem Oberen Keuper zugeordnet. Eine tabellarische Übersicht der Einheiten des Keuper mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der zuvor erstellten Inventarisierungstabelle Thüringen (vgl. Kapitel 5) zu finden.

Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 BGE 2020j) wird für den Keuper die Weser-Formation betrachtet. Alle weiteren Einheiten des Keuper wurden aufgrund ihrer Heterogenität nicht als potentielle Tongesteinsformation eingestuft.

Lithologie (Dockter & Langbein 2003; Nitsch et al. 2011c)

Die Weser-Formation (Oberer Gipskeuper) besteht aus rotbunten und grünen dolomitischen Tonsteinen und Tonmergelsteinen, die meist Sulfatknollen und dünne Dolomitbänke enthalten. In mehreren Horizonten finden sich Einschaltungen von knolligen, teilweise auch geschichteten Sulfatbänken.

Mächtigkeit (Dockter & Langbein 2003; Nitsch et al. 2011c)

Die Weser-Formation ist im Thüringer Becken 67 m – 161 m mächtig. In Südthüringen ist die Mächtigkeit mit 68 m – 86 m geringer.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 121). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 121: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales Gelände- Modell
3	TH	TLUBN	11840020/ 912	ts	INFLUINS	3D-Modell

Eigenrecherche

Es wurden keine weiteren Daten verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Mittleren Keuper in Thüringen geprüft wurde, ist in Tabelle 122 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 122: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM_200_300.ts; DGM_200_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Mittlerer Keuper aus der Topfläche Unterer Keuper (OK_ku)	Skua_model_horizon_OK_ku.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_km_TH_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_km_TH_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_km_TH.dxf MG_t_km_TH.txt
3. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 09_MittlererKeuper

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	TH_k_basis_final.shp
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	Keine verbleibende Fläche

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 122 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell INFLUINS (Verbundprojekt „Integrierte Fluidodynamik in Sedimentbecken“) wurde an der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) in den Jahren 2010 bis 2014 entwickelt. Es deckt das Thüringer Becken ab, welches Teile von Thüringen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt sowie Hessen umfasst und enthält 14 modellierte Horizonte vom Grundgebirge bis zum Känozoikum.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 122 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Als Bearbeitungsfläche wurde die Topfläche Unterer Keuper verwendet, welche die Basis des Mittleren Keuper darstellt (Tabelle 122, 2b).

Das digitale Geländemodell für Thüringen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 122, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 122, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 122, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Mittlerer Keuper und der Topfläche berechnet (Tabelle 122, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Topflächen des Mittleren Keuper und Oberen Keuper, der Basisfläche Känozoikum sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 122, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit

Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Falls in dem Bearbeitungsgebiet 3D-gepufferte Störungen vorhanden sind, wird aus dem Verschnitt mit der Bearbeitungsfläche eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wird. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wird berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche werden gelöscht (Tabelle 122, 2g).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 122, 2h).

Die Bearbeitungsfläche Mittlerer Keuper wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 122, 2i).

2D-Bearbeitung

Die aus dem 3D-Modell resultierende Fläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde die Gesamtfläche in einzelne Flächen getrennt, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft werden konnte (Tabelle 122, 3a). Da die Flächen von allen Gebieten weniger als 10 km² betragen, wurden alle Gebiete entfernt (Tabelle 122, 3b). Eine weitere Bearbeitung entfällt damit.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Keine der aus dem Modell resultierenden Flächen erfüllt diesen Flächenbedarf.

Die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ wird daher als **nicht erfüllt** eingestuft.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort in Betracht zu ziehen, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen die Anforderung nach § 23 Abs. 5 StandAG für die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit nicht erfüllen, werden für die Gesteine des Keuper keine Gebiete in Thüringen ausgewiesen.

Ergebnis

Im Rahmen der Bearbeitung wurden alle Gebiete ausgeschlossen, welche ein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die zusätzlich alle Mindestanforderungen

erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen nicht alle Mindestanforderungen erfüllen, werden für die Gesteine des Keuper keine Gebiete in Thüringen ausgewiesen.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 123 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 123: Übersicht über die entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11840020	912		INFLUINS		3D-Modell

1.3.8 Unterjura – Brandenburg, Berlin

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Unterjura (Lias), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Brandenburg und Berlin.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Brandenburg und Berlin, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Unterjura (Lias)

Der Unterjura, der mit der informellen Bezeichnung Lias in Norddeutschland vertreten ist, kann in folgende Stufen untergliedert werden: Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium. Alle Stufen sind in Brandenburg und Berlin unter Überdeckung von jüngeren Ablagerungen verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden in Brandenburg und Berlin die Stufen des Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Lias und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Brandenburg und Berlin (vgl. Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Der Lias ist in der nördlichen Landeshälfte Brandenburgs nahezu flächendeckend verbreitet (Schudack & Tessin 2015). In Berlin ist der Lias, mit Ausnahme des Nordwestens und Südwestens, ebenfalls größtenteils vertreten. Im Umfeld von Salzstöcken und Salzkissen weisen die Sedimentgesteinsabfolgen des Lias häufig eine geringere Mächtigkeit auf oder fehlen teils vollständig (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e).

Fazies/Ablagerungsraum

Am Übergang der Trias zum Jura erfolgen aus westlicher Richtung marine Transgressionen in das Norddeutsche Becken, welche ihre größte ostwärts gerichtete Ausdehnung im Pliensbachium erreichen (Barth et al. 2018). Insgesamt ist der Lias gekennzeichnet durch eine Abfolge mariner Transgressionen und Regressionen. Der Westteil des Norddeutschen Beckens stellt im Lias größtenteils einen marinen Faziesraum dar, welcher durch die Ablagerung vorwiegend toniger Sedimente gekennzeichnet ist (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e). Im Ostteil dominierten vornehmlich limnisch-brackische Bedingungen. Dieser Ablagerungsraum wurde durch den Eintrag sandiger, terrigener Sedimente des Fennoskandischen Schilds (Petzka et al. 2004), und des Böhmisches Massivs beeinflusst (Paul et al. 2008). Generell ist das Norddeutsche Becken im Lias geprägt durch eine vorwiegend tonige Beckenfazies im Westen sowie durch die Ablagerung sandiger Sedimente im Ostteil des Beckens und in Küstennähe, als Teil der Beckenrandfazies (Hoth et al. 2007; Lott et al. 2010; Barth et al. 2018).

Lithologie

Das Hettangium besteht vorwiegend aus sandig-schluffigen Sedimentgesteinen mit kohligem Resten und teils geringmächtigen Kohleflözen (Schudack & Tessin 2015). Sandsteine sind meist fein- bis mittelkörnig, oft glimmerig und kalkfrei. Schluff- und Tonsteine sind ebenfalls kalkfrei. Das Hettangium wird nicht weiter betrachtet, da es durch sandig-tonige Sedimentation gekennzeichnet ist und somit nicht die Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit erfüllt.

Das Unter-Sinemurium ist im äußersten Westen Brandenburgs marin-tonig ausgebildet (Arietenton-Formation). Nach Osten und Südosten wird es hingegen von fein- bis mittelkörnigen, kaum verfestigten, kalkfreien Sandsteinen aufgebaut (Arietensandstein-Formation). Im westlichen und mittleren Brandenburg bis in den Raum Potsdam-Berlin treten zwischen den marinen Schichten des höheren Sinemurium (Raricostatenton-Formation) geringmächtige rotbraune Tone auf (Schudack & Tessin 2015).

Im Westen und Nordwesten Brandenburgs wird sowohl das Unter-Pliensbachium (Capricornuton-Formation), als auch das Ober-Pliensbachium (Amaltheenton-Formation) von marinen Tonsteinen aufgebaut (Schudack & Tessin 2015). Nach Osten schaltet sich im Mittelteil der Abfolge ein wenige Meter mächtiger Sandstein mit Schluffstein-Einlagerungen ein, dessen Mächtigkeit in östliche Richtung zunimmt. In Ostbrandenburg tritt an der Basis des Unter-Pliensbachium ein geringmächtiges Konglomerat auf. Das Unter-Pliensbachium ist in Ostbrandenburg jedoch nur sehr lückenhaft verbreitet. Größtenteils wird das Sinemurium in dieser Region direkt von Abfolgen des Ober-Pliensbachium überlagert, an dessen Basis ebenfalls häufig ein Konglomerat angetroffen wird. Ton- und Schluffsteine stellen in Ostbrandenburg nur ungefähr 30 % der Gesamtfolge des Pliensbachium dar, welches hier vorwiegend von glimmerhaltigen Fein- und Mittelsandsteinen aufgebaut wird (Schudack & Tessin 2015).

Das Toarcium besteht im Westen Brandenburgs weitgehend aus bituminösen, kalkhaltigen Tonsteinen (Posidonienschiefer-Formation). Nach Osten verzahnen sich diese mit Tonsteinen der „Grünen Serie“ (Schudack & Tessin 2015), welche teils Wechsellagerungen von Sand- und Tonsteinen enthält (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e).

Mächtigkeit

Die Sedimentgesteinsabfolgen des Hettangium und Sinemurium weisen eine Gesamtmächtigkeit von 80 – 160 m auf (Schudack & Tessin 2015). Die Mächtigkeit des Sinemurium ist gebietsweise reduziert und die Grenze zum hangenden Pliensbachium unregelmäßig ausgeprägt. Diese Schichtlücke ist je nach Region unterschiedlich stark ausgebildet oder teils nicht vorhanden. Die Mächtigkeit des Pliensbachium variiert zwischen 100 m – 150 m (Schudack & Tessin 2015). Die Mächtigkeit des Toarcium beträgt 60 m – 125 m (Schudack & Tessin 2015).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 124). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 124: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales-Gelände-Modell
3	BB	LBGR	11878605/7872	ts	Brandenburg 3D	3D-Modell
4	DE	BGR	11897915_02/9557	pdf	RegionaleTonstudie_OASYS	Regionale Tonstudie 2001
5	DE	BGR	11897915/9559	pdf	Tongesteine als Barriere_jm_NE-D	Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2003)
6	DE	BGR	11844870_01/6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
7	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Norddeutschland_Ost	Bohrdatenbank Tonstudie
8	BB	LBGR	11874780/ 8997	mdb	Endlager_BGE_300_freidSV_Doku	Schichtenverzeichnisse Bohrdatenbank BB
9	BB	LBGR	11884623/ 8939	mdb	Endlager_BGE_300_vertr_dsv_pdf	Schichtenverzeichnisse Bohrdatenbank BB

Eigenrecherche

Thematische Karten

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

Schudack, m. & Tessin, R. (2015): Jura In: Stackebrandt, W. & Franke, D. (Hrsg.): Geologie von Brandenburg, S. 217-240.

6. Abb. 3.2.7-1: Heutige Verbreitung und Ausbildung von Ablagerungen des Lias (Unterjura) in Brandenburg, mit nördlicher und südlicher Profillinie Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): Lias: Hettang + Untersinemur. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): Lias: Obersinemur + Carix. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): Lias: Domer. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): Lias: Toarc. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Lias in Brandenburg und Berlin geprüft wurde, ist in Tabelle 125 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 125: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Lias aus der Basisfläche K2 (Top Oberer Gipskeuper)	b_Lias_BB.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Lias_BB_MACRORESULT.ts
g) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Lias_BB_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_ju_BB.dxf MG_t_ju_BB.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Import der Fläche aus 2i als DXF in Arc-GIS Pro	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Verschneiden der Flächen mit der Bundeslandgrenze Brandenburgs	
c) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als Shape-Datei	MG_t_ju_BB.shp
d) Georeferenzieren der in Kapitel 3.2 aufgeführten thematischen Karten von Tessin et al. (1975a); (Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e) und Schudack & Tessin (2015)	Hettang_Toarc_ZGI_1975.tif Hettang_Untersinemur_ZGI_1975.tif Obersinemur_Carix_ZGI_1975.tif Domer_ZGI_1975.tif Toarc_ZGI_1975.tif Verbreitung_Unterjura_BB.tif
e) Vektorisieren der Verbreitung des vorwiegend tonigen Hettangium bis Untersinemurium (Schudack & Tessin 2015)	BB_juhe_jusiu_t.shp
f) Vektorisieren der Verbreitung der am stärksten marin beeinflussten Sedimente im Obersinemur/Carix, der Westgrenze der Verbreitung der Grünen Serie und der Ostgrenze der Verbreitung des Posidonien-schiefers (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e)	BB_ju_Verbreitungsgrenzen_ZGI.shp
g) Beschneiden der Flächen aus 3c) mit der Begrenzung der Fläche aus 3e) und den Verbreitungsgrenzen aus 3f)	
h) Überprüfen und Anpassen der Gebiete anhand der Geodaten der Bohrdatenbank der Tonstudie von (Hoth et al. 2007) und der Schichtenverzeichnisse der Bohrdatenbank BB des LBGR	
i) Entfernen aller Gebiete mit einer Fläche kleiner als 10 km ² und Benennung der Gebiete	BB_Lias_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 125 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell Brandenburg 3D (B3D) wurde vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) in Zusammenarbeit mit dem Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) entwickelt. Das Modellgebiet umfasst die Bundesländer Berlin und Brandenburg und enthält 12 reflexionsseismische Horizonte (Schilling et al. 2018):

- T1 (Transgressionsfläche Känozoikum)
- B2-T2 (Transgressionsfläche Mittelalb bis Cenoman)
- T3-T4 (Transgressionsfläche Unterhalb bis Wealden)
- E1-E2 (Intra-Oxford bis Kimmeridge)
- L1 (Intra-Toarc)
- K2 (Top Oberer Gipskeuper)
- M1 (Intra-Hauptmuschelkalk)
- S1 (Top Salinarröt)
- X1 (Top Zechsteinsalinar)
- Z1 (Top Unterer Staßfurtanhydrit)
- Z3 (Basis Werraanhydrit)
- R6 (Basis Oberrotliegend II)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 125 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Erstellung der Bearbeitungsfläche Lias wurde die Basisfläche K2 (Top Oberer Gipskeuper) verwendet.

Das digitale Geländemodell für Brandenburg und Berlin wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 125, 2a-e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Lias und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen L1, E1-E2,

T3-T4, B2-T2 und T1 sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde (Tabelle 125, 2f).

Falls in dem Bearbeitungsgebiet 3D-gepufferte Störungen vorhanden sind, wird aus dem Verschnitt mit der Bearbeitungsfläche eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wird. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wird berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche werden gelöscht (Tabelle 125, 2g).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 125, 2h).

Die Bearbeitungsfläche Lias wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 125, 2i).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Zur Ausweisung von identifizierten Gebieten im Tongestein des Lias in Brandenburg und Berlin wurden ausgewählte Verbreitungskarten georeferenziert und vektorisiert. Die verwendeten Karten sind in Kapitel 3.2 aufgelistet.

Die aus dem Grundmodell Brandenburg 3D abgeleitete Bearbeitungsfläche Lias wurde mit Hilfe der in Kapitel 3.2 genannten thematischen Karten erweitert und in Bereichen weiter eingegrenzt (Werkzeug „Feature erstellen“ sowie „Feature ändern“). Die dadurch erhaltenen Flächen liegen als Polygone vor. Diese Flächen wurden hinsichtlich der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ geprüft. Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt.

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bildet die „Geologie von Brandenburg“ zur Verbreitung des Lias in Brandenburg (Schudack & Tessin 2015). Unterstützend findet die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007) sowie deren Zwischenbericht von 2001 Anwendung.

Diese Studien wurden zur weiteren Beurteilung der mit dem verwendeten Kartenmaterial erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Lias geprüft.

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Landesgrenzen von Brandenburg und Berlin geprüft. Zehn Bohrungen erfüllen dabei die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in den auf Grundlage des Kartenmaterials ausgewiesenen Flächen. Es handelt sich hier um die Bohrungen Bernheide 1E/64, Wittenberge 3/58, Karstädt-Süd 3/58, Karstädt-Nord 7/58, Schilde 1/69, Königsberg 105/64, Königsberg 103/63, Bad Wilsnack 4/59, Rhinow 3/59 und Viesen-Lehmin 102/65. In den vorgenannten Bohrungen wurden die Stufen des Lias innerhalb der Tiefenlage von 300 m – 1500 m mit Tonanteilen zwischen 60 % und 80 %, teils größer als 80 %, und einer kumulativen Mächtigkeit zwischen 117 m und 382 m erbohrt.

Die Auswertung der digitalen Schichtenverzeichnisse des LBGR, welche der BGE als Datenbankauszug vorliegen, haben in den relevanten Regionen aufgrund teils fehlender lithologischer Angaben keine Hinweise auf Tongesteinsabfolgen des Lias gegeben, welche die Mindestanforderungen der Mindestmächtigkeit sowie der Teufenlage erfüllen.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. (Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994)). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden (Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle). Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen. Jedoch weisen Hoth et al. (2007) darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeiten und Tonanteils-Klassen zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit nur teilweise oder nicht erfüllt ist.

Wie aus der Inventarisierungstabelle (vgl. Kapitel 5) zu entnehmen ist, sind die Tongesteinsformationen des Lias lateral heterogen aufgebaut. Im Westen und Nordwesten von

Brandenburg werden die Formationen vorwiegend von marinen Tonstein- und Schluffsteinabfolgen aufgebaut, welche teils bituminös und kalkhaltig sind. Nach Osten wird eine Zunahme sandiger Sedimente beobachtet, welche in Ostbrandenburg größtenteils die Abfolgen des Lias aufbauen. Anhand lithologisch-paläogeographischer Karten des ZGI (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e) und der Kartendarstellung zur heutigen Verbreitung des Lias in Brandenburg (Schudack & Tessin 2015) konnten tonige Faziesbereiche im Westen Brandenburgs identifiziert werden.

Weiterhin bestätigen Bohrungsdaten der Tonstudie (Bernheide 1E/64, Wittenberge 3/58, Karstädt-Süd 3/58, Karstädt-Nord 7 /58, Schilde 1/69, Königsberg 105/64, Königsberg 103/63, Bad Wilsnack 4/59, Rhinow 3/59 und Viesen-Lehmin 102/65) das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit einem Tonanteil von 60 % – 80 % und teils größer als 80 % in den ausgewiesenen Gebieten mindestens teilweise (Hoth et al. 2007).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Unterjura in den verbleibenden Gebieten in Brandenburg und Berlin **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Lias wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Abfolge zwischen dem Top des Oberen Gipskeuper und dem Intra-Toarc zusammen. Als geeignete Tongesteine wurden jedoch lediglich die Stufen des Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium ausgewiesen. Es ist daher anzunehmen, dass nur in Teilen der ausgewiesenen Gebiete eine Mächtigkeit des Tongesteins von 100 m erreicht wird. Dennoch werden für die angegebenen Stufen in den betrachteten Gebieten Mächtigkeiten von zum Teil deutlich mehr als 100 m beschrieben (siehe Kapitel 4.1.2). Zum jetzigen Zeitpunkt kann jedoch keine weitere Eingrenzung vorgenommen werden.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden Bohrdaten der Tonstudie sowie verschiedene thematische Karten hinsichtlich der Mächtigkeiten größer als 100 m der Ablagerungen im Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e) geprüft. Da die thematischen Karten (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e) sowie mindestens zehn Bohrungen in den ausgewiesenen Flächen in Brandenburg und Berlin (kumulative) Mächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Unterjura wurde im südlichen Teil anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m

u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Des Weiteren wurden Bohrdaten hinsichtlich der Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m unter der Geländeoberkante geprüft. Da mit mindestens zehn Bohrungen in den ausgewiesenen Flächen in Brandenburg und Berlin Sedimentgesteinsabfolgen des Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium in Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m nachgewiesen wurden, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für die verbleibenden Gebiete als zunächst **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Brandenburg und Berlin können Gebiete ausgewiesen werden, in denen die Formationen des Lias alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell vorgestellt (Abbildung 54).

Ergebnis

In Abbildung 54 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Lias in Brandenburg und Berlin dargestellt. Ein repräsentativer geologischer Profilschnitt ist in Abbildung 55 dargestellt. Das Profil gibt exemplarisch die geologische Situation im Umfeld der Gebiete wieder, welche die Mindestanforderungen erfüllen. In Tabelle 126 werden die Gebiete aufgeführt, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

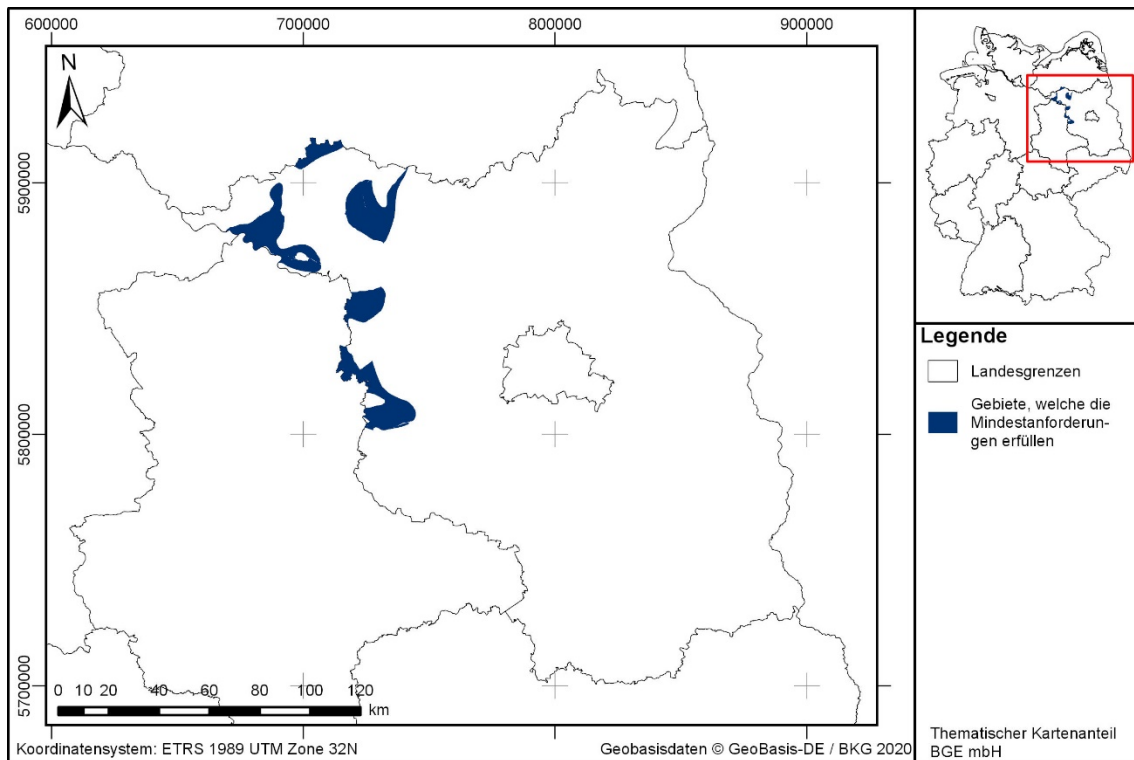


Abbildung 54: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Lias in Brandenburg und Berlin

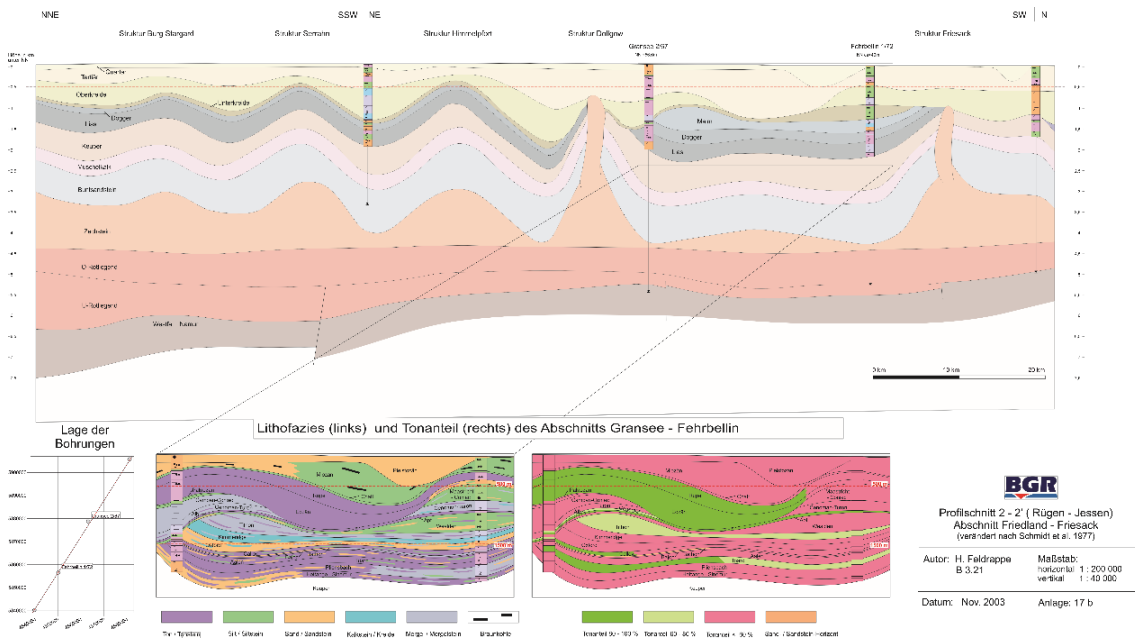


Abbildung 55: Profilschnitt von der Struktur Burg Stargard bis Struktur Friesack mit Lage der Bohrungen (Feldrappe 2003). Der Nordost-Südwest verlaufende Abschnitt bildet das Deckgebirge in den ausgewiesenen Gebieten in Brandenburg ab.

Tabelle 126: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_ju_BB_1	381
MG_t_ju_BB_2	92
MG_t_ju_BB_3	165
MG_t_ju_BB_4	349
MG_t_ju_BB_5	355

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 127 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 127: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11878605	7872		Brandenburg 3D		3D-Modell
11884574	8906	2385810	Norddeutschland_Ost	Bernheide 1E/64, Wittenberge 3/58, Karstädt-Süd 3/58, Karstädt-Nord 7 /58, Schilde 1 /69, Königsberg 105 /64, Königsberg 103 /63, Bad Wilsnack 4 /59, Rhinow 3 /59, Viesenberg 102/65	Bohrdatenbank Tonstudie

Entscheidungserhebliche thematische Karten aus Eigenrecherche

Schudack, M. & Tessin, R. (2015): Jura In: Stackebrandt, W. & Franke, D. (Hrsg.): Geologie von Brandenburg, S. 217-240.

1. Abb. 3.2.7-1: Heutige Verbreitung und Ausbildung von Ablagerungen des Lias (Unterjura) in Brandenburg, mit nördlicher und südlicher Profillinie Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung des vorwiegend tonigen Hettangium bis Untersinemurium.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-

paläogeographische Karte der DDR – Lias. Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der am stärksten marin beeinflussten Sedimente im Obersinemur/Carix, Westgrenze der Verbreitung der Grünen Serie und Ostgrenze der Verbreitung des Posidonienschiefers.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): Lias: Hettang + Untersinemur. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): Lias: Obersinemur + Carix. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): Lias: Domer. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): Lias: Toarc. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

1.3.9 Unterjura – Niedersachsen, Bremen, Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Unterjura (Lias), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet Niedersachsen, Hamburg und Bremen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, Hamburg und Bremen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Unterjura (Lias)

Der Unterjura, der mit der informellen Bezeichnung Lias in Norddeutschland vertreten ist, kann in folgende Stufen untergliedert werden: Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016; Mönnig et al. 2018). Alle Stufen sind in Niedersachsen, Hamburg und Bremen unter Bedeckung verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden in Niedersachsen, Hamburg und Bremen alle Stufen betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Lias und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Niedersachsen, Hamburg und Bremen (vgl. Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Im zentralen Bereich Niedersachsens und im Westniedersächsischen Tiefland sind die Abfolgen des Lias flächendeckend verbreitet. Die Sedimente des Lias sind lokal im Ostniedersächsischen Tiefland, zwischen Uelzen und Celle, im Bereich des Niedersächsischen Berglandes und im Nordwesten Niedersachsens, im Raum Emden und Wilhelmshaven, erodiert und/ oder nicht abgelagert (Baldschuhn et al. 2001).

Fazies/Ablagerungsraum

Die paläogeographische Situation im Jura wurde durch den fortschreitenden Zerfall des Superkontinentes Pangäa, welcher bereits im späten Perm initiiert und in der späten Trias und im frühen Jura intensiver wurde, geprägt (Meschede 2018; Barth 2019). Als Resultat der West-Ost gerichteten Dehnungsspannungen, die auch das tektonische Regime des Zentraleuropäischen Beckens dominierten, bildeten sich Nordwest-Südost orientierte Grabensysteme, wie z. B. der Zentralgraben im Nordseeraum (Barth 2019). Die Hochgebiete im Südwesten Europas, die noch in der späten Trias eine Barriere zwischen dem Germanischen Becken und der Neotethys bildeten, wurden aufgrund der darauffolgenden thermischen Erdkrustenabsenkung und des globalen Meeresspiegelanstiegs allmählich überflutet (Meschede 2018; Barth 2019). Als Resultat der thermischen Subsidenz drang ebenfalls das Nordmeer immer weiter nach Süden vor und stellte schließlich über das epikontinentale Flachmeer Zentraleuropas hinweg eine Verbindung der nördlichen Meeresgebiete mit der Neotethys im Süden her (Meschede 2018). Dementsprechend herrschten während dieser geologischen Phase des frühen Jura im Zentraleuropäischen Becken fast vollständig marine Bedingungen, wobei das Lias-Meer seine größte Ausdehnung im Nordwestdeutschen Becken erreichte (Hoth et al. 2007; Mönnig 2008; Meschede 2018). Generell ist das Norddeutsche Becken im Lias geprägt durch eine vorwiegend tonige Beckenfazies im Westen sowie durch die Ablagerung sandiger Sedimente im Ostteil des Beckens und in Küstennähe, als Teil der Beckenrandfazies (Hoth et al. 2007; Lott et al. 2010; Barth et al. 2018).

Lithologie (Nitsch et al. 2015; Mönnig et al. 2015b; Deutsche Stratigraphische Kommission 2016)

Der Unterjura ist im Norden Deutschlands vielerorts durch dunkle, bituminöse Tonsteine und Mergel gekennzeichnet. An der Basis der Abfolge finden sich in den östlichen Randlagen aber auch klastische Einschaltungen mit Sandsteinen und Konglomeraten. Die schwarze Farbe der Tonsteine, Mergel und Kalke stammt aus organischen Resten, die durch die Verfestigung des Gesteins in Bitumen und fein verteilten Pyrit (FeS_2) umgewandelt wurden (Meschede 2018).

Hettangium: bituminöse Ton- und Mergelsteine

Sinemurium: eintönige, dunkle Tonsteine mit 3 cm – 40 cm dicken Toneisenstein-Lagen oder Kalksteinbänken

Pliensbachium: In Norddeutschland kalkarme, schwarzgraue Tonsteine, oft feinsandig in helleren Flasern, nach Nordosten zunehmend, östlich der Altmark in die sandige und brackische Komorowo-Formation übergehend. Charakteristisch sind Lagen von Toneisensteingeoden, oder durchgehende sideritische Bänke. Im Emsland auch bituminöse Fazies.

Das Toarcium kann in die Posidonienschiefer-Formation und Jurensismergel-Formation untergliedert werden. Der Posidonienschiefer ist vorherrschend durch schwarzgraue bis

bräunlich schwarze feingeschichtete Ton- und Tonmergelsteine sowie Mergel- bis Kalkmergelsteine mit wenigen laminierten Kalksteinbänken oder Konkretionslagen charakterisiert. An und nahe der Basis sind gebietsweise geringmächtige graue Tonmergelsteine eingeschaltet, die übrige Abfolge ist stark bituminös mit Kohlenstoffgehalten zwischen 2 % und 16 %.

Mächtigkeit (Nitsch et al. 2015; Mönnig et al. 2015; Menning & Hendrich 2016):

Die Gesamtmächtigkeit der Gesteinsserien des Lias beträgt in Norddeutschland maximal 1500 m (Hoth et al. 2007). Hohe Mächtigkeiten treten in Nordwestdeutschland in den Zentren des Norddeutschen Beckens und des Niedersächsischen Beckens auf. In Randsenken wie dem Gifhorner Trog, deren Entstehung auf halokinetische Prozesse zurückzuführen ist, weisen die Sedimentgesteinsabfolgen des Lias ebenfalls bedeutende Mächtigkeiten auf. Aufgrund regional unterschiedlicher Abtragungsraten ist die Gesamtmächtigkeit des Lias in Niedersachsen gebietsweise deutlich reduziert. Im Extremfall wurden die Sedimentgesteine teils vollständig erodiert (Hoth et al. 2007).

Hettangium: Aus der der BGE vorliegenden Literatur sind keine Angaben zur Mächtigkeit der Sedimentgesteinsabfolgen des Hettangium bekannt. In den Bohrungen Lehrte 11 und Linsburg Z1 der Tonstudie von Hoth et al. (2007) wurden Tongesteinsabfolgen des Lias jedoch mit Mächtigkeiten von 110 m erbohrt

Sinemurium: Mittlere Mächtigkeit in Norddeutschland 50 m – 80 m, maximale Mächtigkeiten: 180 m (Bohrung Wesendorf im Gifhorner Trog)

Pliensbachium: Mittlere Mächtigkeit in Norddeutschland 100 m – 200 m, maximale Mächtigkeiten: 175 m in der Bohrung Reitbock-Leversen

Toarcium/Posidonien-schiefer: Mittlere Mächtigkeit in Norddeutschland 20 m – 100 m, maximale Mächtigkeiten: größer als 180 m (Emsland: Bohrung Etzel 24; Hoffmann 1968)

Toarcium/Jurensis-mergel: Mittlere Mächtigkeit in Norddeutschland 5 m – 20 m, maximale Mächtigkeiten: 27 m (Bielefeld)

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 128). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 128: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	NI	LBEG	11842295/ 7775	ts	BGE-GTA3D	3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
2	HH	BUE	11880284/843 4	ASCII/ts	Tiefenmodell Hamburg	3D-Modell von Hamburg mit 2 Basis- und 1 Topfläche
3	DE	BKG	11865482/885 3	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
4	DE	BKG	11875056/772 8	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Bundesländergrenzen inkl. 12-Seemeilen-Zone
5	DE	BGR	11844870_01/ 6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
6	DE	BGR	11884574/890 6	mdb	Norddeutschland_West	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
7	DE	LBEG	11881514/910 5	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 1. Teil	Landes-Bohrdatenbank Niedersachsen (LBEG)
8	DE	LBEG	11881514/910 5	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 2. Teil	Landes-Bohrdatenbank Niedersachsen (LBEG)
9	DE	LBEG	11881514/910 8	mdb	Bohr_prg (+ Daten)	Digitalisierte Daten der Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank
10	DE	BGR		pdf	InSpEE-Bericht_2016	PDF-Bericht InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
11	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturumrisse_500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
12	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturum- risse_1000m	Digitale Höhenlinien Inspee (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
13	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturum- risse_1500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
14	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturum- risse_2000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Lias in Niedersachsen geprüft wurde, ist in Tabelle 129 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt. Hamburg und Bremen sind in dem für Niedersachsen verwendeten Modell enthalten, weshalb die drei Bundesländer gemeinsam bearbeitet wurden.

Tabelle 129: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Lias aus der Basisfläche Lias 11_jutco-jmclo (aus allen Kacheln)	b_Lias_NI.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Lias_NI_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Lias_NI_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_ju_NI.dxf MG_t_ju_NI.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	Tonstudie_Lias_NDB 06
a) Umwandlung der DXF – Fläche aus 2i) in ein 2D - Shape und Zusammenfassen der Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Dissolve“	NI_MA_Gebiet_2D_Dissolve.shp
b) Beschneidung des Polygons mit der Landesgrenze Niedersachsens, Hamburgs und Bremens	NI_MA_Gebiet_2D_Dissolve_Clip.shp
c) Entfernung von Flächen kleiner 10 km ² (Ausnahme Bundeslandgrenzen)	NI_MA_Gebiet_2D_Dissolve_Clip_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 129 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D; Bombien et al. 2012) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell ist die digitale Umsetzung des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = Digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tpl = Mittelmiozän bis Pliozän

- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg sowie weite Teile von Niedersachsen, mit Ausnahme des südlichen Bereichs ab Höhe Göttingen, ab. Die Flächen des GTA3D sind in 42 Kacheln untergliedert.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 129 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen kachelweise vor, daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Lias-Basisflächen (12_juhe-jutcu) erzeugt. Allerdings sind an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermessung) offenkundig.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 129, 2a – e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Lias und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Dogger,

Malm, der Unter- sowie Oberkreide, des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM__{-300m}) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM__{-1500m} angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 129, 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 – 1500 m u. GOK) eingehalten werden. Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profileschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit den Lokalitäten und den Umrissen von Salz in steiler Lagerung nach Baldschuhn et al. (2001), Gast & Riesenberg (2016) und (Pollok et al. 2016) verglichen. Schließlich wurden ausgewiesene Flächen innerhalb der Lokalitäten von Salzstrukturen bzw. Salz in steiler Lagerung herausgeschnitten (Tabelle 129, 2g – h).

Die Bearbeitungsfläche Lias wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 129, 2i).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurden die nicht zusammenhängenden Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen. Anschließend wurden alle Gebiete außerhalb der Landesgrenzen von Niedersachsen, Hamburg und Bremen entfernt. Zum Schluss erfolgte die Prüfung des Flächenbedarfs. Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt, mit Ausnahme von Gebieten, die an der Grenze zu Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt, Brandenburg oder Nordrhein-Westfalen liegen und dort fortgeführt werden.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Hoth et al. 2007; Barth 2019) sowie Verbreitungskarten (Doornenbal & Stevenson 2010) herangezogen. Biofazieskarten des Lias von Norddeutschland (Barth 2019) zeigen, dass die gesamte Fläche Niedersachsens in allen Stufen des Lias von einem tiefmarinen Ablagerungsraum geprägt ist, was die Ablagerung toniger Lithologien zur Folge hat. Dies bestätigt die Verbreitung von Tongestein im Betrachtungsraum und somit die durch das 3D-Modell erstellten Flächen.

Allgemeine Literatur

Zur Anwendung kamen verschiedene Studien wie die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2013) sowie das Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland (Reinhold et al. 2011). Diese wurden zur Beurteilung der mit dem 3D-Modell erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden auf die lithologischen Abfolgen des Lias geprüft.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt ist.

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Landesgrenzen von Niedersachsen, Hamburg und Bremen geprüft. Neun Bohrungen erfüllen dabei die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in der auf Grundlage des 3D-Modells ausgewiesenen Fläche. Die Bohrungen zeigen Tongehalte zwischen 60 % und teilweise mehr als 80 % und kumulative Mächtigkeiten zwischen etwa 100 m und 340 m. Beispielhaft werden hier die Bohrungen Oberg T 1/1971, Hänigsen (Siegfried) 111/1959, Kalkriese 1/1937, Schale Z1/1963, Stolzenau Z1/1965 im Lias mit einem Tongehalt von mindestens 80 % und kumulativen Mächtigkeiten von 342 m, 144 m, 314 m, 233 m und 136 m genannt.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden (Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle). Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen. Jedoch weisen Hoth et al. (2007) darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tonge-

steinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse, zeigen Bereiche in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit, teilweise oder nicht erfüllt ist.

Wie aus der Inventarisierungstabelle zu entnehmen ist (vgl. Kapitel 5), sind die Tongesteinsformationen des Lias überwiegend homogen aufgebaut. Neben Ton- und Tonmergelstein, die dominant vorliegen, enthalten die Formationen teilweise Einschaltungen von z. B. Mergel(ton)stein, Kalkmergel und sandige Ablagerungen. Häufig kommen Lagen und Einschaltungen von Toneisensteingeoden vor. Die Auswertung der Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) zeigt fünf Bohrungen mit Tonanteilen zwischen 60 % und teilweise mehr als 80 %. Beispielhaft sind hier die Bohrungen Oberg T1/1971, Hänigsen (Siegfried) 111/1959), Kalkriese 1/1937, Schale Z1/1963 und Stolzenau Z1/1965, welche im Lias Tonanteile von mindestens 80 % aufweisen. Diese bestätigen das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit (Hoth et al. 2007).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Unterjura (Lias) für die verbleibenden Gebiete **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Lias wurde im 3D-Raum berechnet. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Topfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Lias zusammen.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden Bohrdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) hinsichtlich der Mächtigkeiten größer 100 m der Ablagerungen im Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium geprüft. Da insgesamt fünf Bohrungen (Oberg T1/1971, Hänigsen (Siegfried) 111/1959), Kalkriese 1/1937, Schale Z1/1963, Stolzenau Z1/1965) der Tonstudie in den ausgewiesenen Flächen in Niedersachsen im Lias Mächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Unterjura wurde im südlichen Teil anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Des Weiteren wurden Bohrdaten hinsichtlich der Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m unter der Geländeoberkante geprüft. Da fünf Bohrungen (Oberg T1/1971, Hänigsen (Siegfried) 111/1959), Kalkriese 1/1937, Schale Z1/1963, Stolzenau Z1/1965)

der Tonstudie von Hoth et al. (2007) in den ausgewiesenen Flächen in Niedersachsen im Lias Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m zeigen, wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Niedersachsen können Gebiete ausgewiesen werden, in denen die Formationen des Lias alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell vorgestellt (Abbildung 56).

Ergebnis

In Abbildung 56 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Lias in Niedersachsen, Hamburg und Bremen dargestellt. Ein repräsentativer geologischer Profilschnitt wird in Abbildung 57 gezeigt. Das Profil gibt exemplarisch die geologische Situation im Umfeld der Gebiete wieder, welche die Mindestanforderungen erfüllen. In Tabelle 130 werden die Gebiete aufgeführt, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

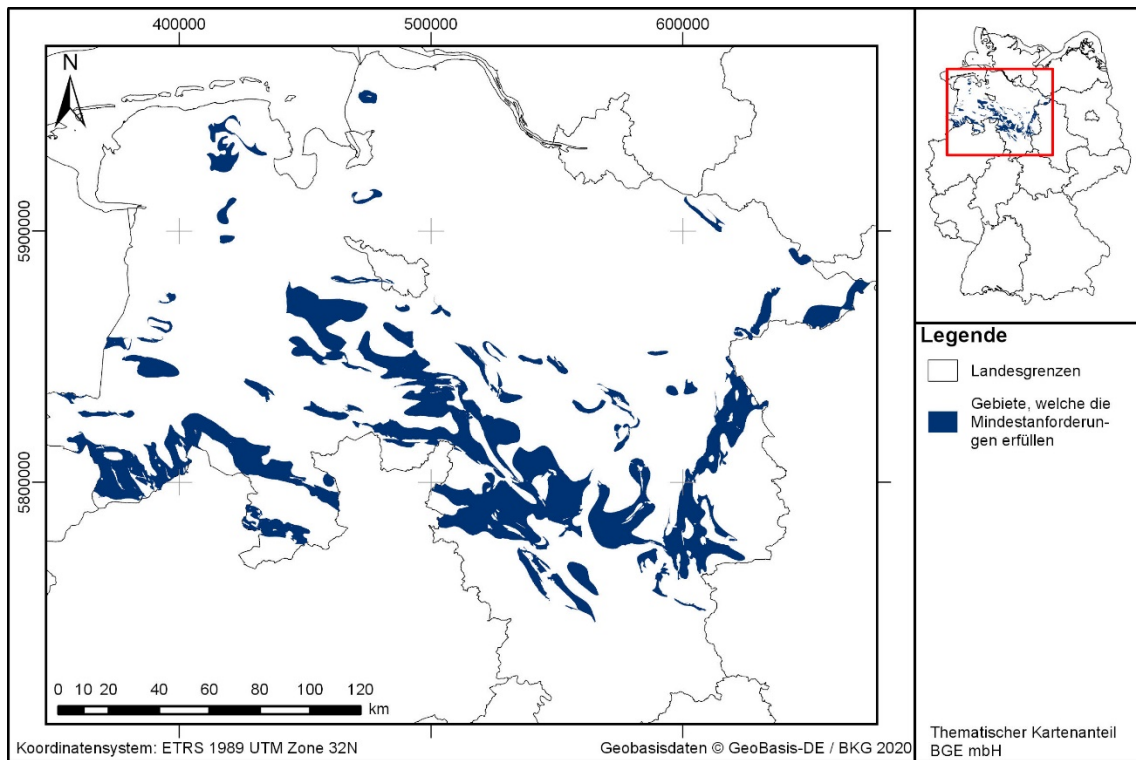


Abbildung 56: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Lias in Niedersachsen, Hamburg und Bremen

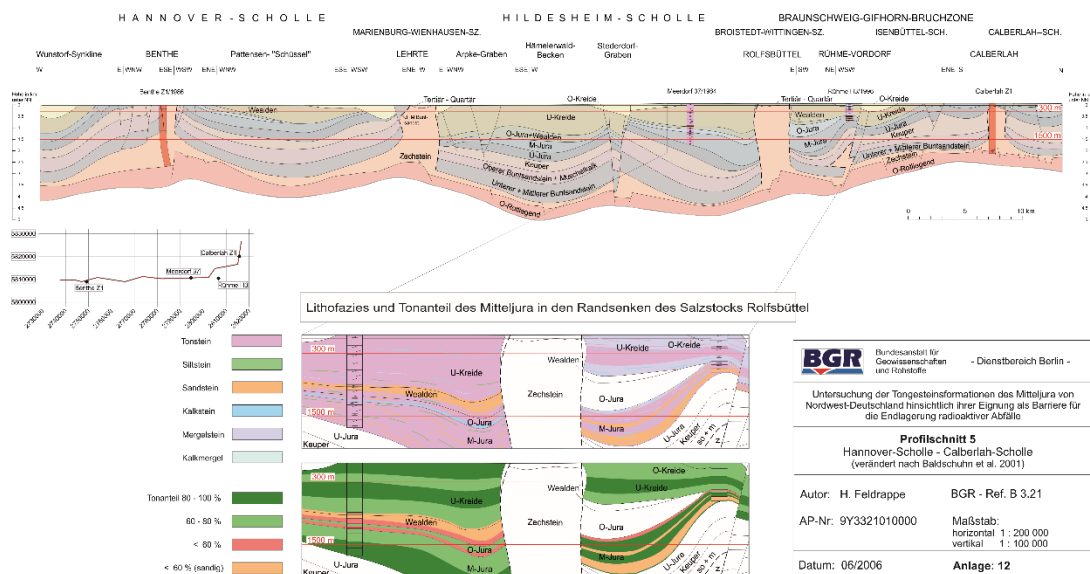


Abbildung 57: Profilschnitt von der Wunstorf-Synklinal zur Calberlah-Scholle (Feldrappe 2006)

Tabelle 130: *Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km², befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.*

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_ju_NI_1	1080
MG_t_ju_NI_2	499
MG_t_ju_NI_3	2264
MG_t_ju_NI_4	36
MG_t_ju_NI_5	34
MG_t_ju_NI_6	39
MG_t_ju_NI_7	12
MG_t_ju_NI_8	119
MG_t_ju_NI_9	16
MG_t_ju_NI_10	49
MG_t_ju_NI_7	12
MG_t_ju_NI_8	119
MG_t_ju_NI_9	16
MG_t_ju_NI_10	49
MG_t_ju_NI_11	73
MG_t_ju_NI_12	34
MG_t_ju_NI_13	30
MG_t_ju_NI_14	11
MG_t_ju_NI_15	51
MG_t_ju_NI_16	26
MG_t_ju_NI_17	63
MG_t_ju_NI_18	58
MG_t_ju_NI_19	20
MG_t_ju_NI_20	94
MG_t_ju_NI_21	32
MG_t_ju_NI_22	11
MG_t_ju_NI_23	16

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km²]
MG_t_ju_NI_24	18
MG_t_ju_NI_25	17
MG_t_ju_NI_26	11
MG_t_ju_NI_27	31
MG_t_ju_NI_28	44
MG_t_ju_NI_29	17
MG_t_ju_NI_30	71
MG_t_ju_NI_31	83
MG_t_ju_NI_32	11
MG_t_ju_NI_33	1313
MG_t_ju_NI_34	34
MG_t_ju_NI_35	36
MG_t_ju_NI_36	12
MG_t_ju_NI_37	15
MG_t_ju_NI_38	159
MG_t_ju_NI_39	29
MG_t_ju_NI_40	30
MG_t_ju_NI_41	12
MG_t_ju_NI_42	18
MG_t_ju_NI_43	18
MG_t_ju_NI_44	24
MG_t_ju_NI_45	21
MG_t_ju_NI_46	27
MG_t_ju_NI_47	72
MG_t_ju_NI_48	154
MG_t_ju_NI_49	36
MG_t_ju_NI_50	2
MG_t_ju_NI_51	8
MG_t_ju_NI_52	1
MG_t_ju_NI_53	8

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 131 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 131: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten . und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserheb- liches Datum aus der Datei	Beschreibung
11842295	7775		BGE-GTA3D		3D-Modell für Niedersachen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
11880284	8434		Tiefenmodell Hamburg		3D-Modell von Hamburg mit 2 Basis- und 1 Topfläche
11884574	8906	2385811	Norddeutschland_West	Schichtenverzeichnisse: Oberg T 1/1971, Haenigsen (Siegfried) 111/1959), Kalkriese 1/1937, Schale Z1/1963, Stolzenau Z1/1965	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)

1.3.10 Unterjura – Nordrhein-Westfalen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Unterjura (Lias), der aufgrund seiner lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Nordrhein-Westfalen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographischer Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Nordrhein-Westfalen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Unterjura (Lias)

Der Unterjura, der mit der informellen Bezeichnung Lias in Norddeutschland vertreten ist (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016; Mönnig et al. 2018), kann in folgende Stufen untergliedert werden: Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium, Toarcium. Alle Stufen sind in Nordrhein-Westfalen verbreitet. Auf Basis von allgemein verfügbaren Informationen (z. B. Grabert 1998a) wurden die Ablagerungen der Stufen des Hettangium und Toarcium in Nordrhein-Westfalen als Tongestein eingestuft. Die Stufen Sinemurium und Pliensbachium führen Schichten mit fraglicher lithologischer Ausbildung. Da die gesamte Abfolge des Lias tonig-dominiert ist, wird im folgenden Protokoll die gesamte Einheit Lias auf die Erfüllung der Mindestanforderungen geprüft. Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Lias und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Nordrhein-Westfalen entnommen werden (vgl. Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Nicht alle Stufen des Unterjura sind flächendeckend in Nordrhein-Westfalen verbreitet. Alle Stufen kommen im Norden und Osten des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen vor (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016). Ablagerungen der Stufen des Hettangium und Sinemurium kommen flächendeckend bis zum Niederrhein und der Eifel vor

(Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016). Ablagerungen des Pliensbachium und des Toarcium kommen im Bereich des Weser- und Osnabrücker Berglandes sowie im Münsterland vor (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016).

Fazies/Ablagerungsraum

Die paläogeographische Situation im Jura wurde durch den fortschreitenden Zerfall des Superkontinentes Pangäa, welcher bereits Ende Perm initiiert und in der späten Trias und im frühen Jura intensiver wurde, geprägt (Meschede 2018; Barth 2019). Als Resultat der West-Ost gerichteten Dehnungsspannungen, die auch das tektonische Regime des Zentraleuropäischen Beckens dominierten, bildeten sich Nordwest-Südost orientierte Grabensysteme, wie z. B. der Zentralgraben im Nordseeraum (Barth 2019). Die Hochgebiete im Südwesten Europas, die noch in der späten Trias eine Barriere zwischen dem Germanischen Becken und der Neotethys bildeten, wurden allmählich aufgrund der darauffolgender thermischer Erdkrustenabsenkung und des globalen Meeresspiegelanstiegs überflutet (Meschede 2018; Barth 2019). Als Resultat der thermischen Subsidenz drang ebenfalls das Nordmeer immer weiter nach Süden vor und stellte schließlich über das epikontinentale Flachmeer Zentraleuropas hinweg eine Verbindung der nördlichen Meeresgebiete mit der Neotethys im Süden her (Meschede 2018). Zu dieser Zeit des Unteren Jura herrschten im gesamten Norddeutschen Becken fast vollständig marine Bedingungen (Hoth et al. 2007; Zimmermann et al. 2015). Im Verlaufe des Unteren Jura kam es dann zu marinen Trans- und Regressionen, die ebenfalls in den Ablagerungen des Unterjuras in Nordrhein-Westfalen dokumentiert sind. Während des Unteren Sinemurium lässt die Ablagerung der Abfolge dickbankiger Kalksteine auf stärker bewegtes Flachwasser schließen (Grabert 1998a; Zimmermann et al. 2015). Wohingegen Ablagerungen des Pliensbachium ruhige marine Sedimentationsbedingungen belegt. Zu dieser Zeit hat das Lias-Meer seine größte Ausdehnung im Nordwestdeutschen Becken (Grabert 1998a; Zimmermann et al. 2015). Während der Ablagerung des Posidonienschiefers im Toarcium herrschten Stillwasserbedingungen (Grabert 1998a).

Lithologie

Tongesteine dominieren die Ablagerungen des Lias. Ein dickbankiger Kalkstein ist charakteristisch für die für die Abfolge der unteren Sinemurium (Grabert 1998a). Die Stratigraphische Gliederung des Jura gibt einen Überblick über die auftretenden Einheiten und vorherrschenden Gesteine (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016). Als Tongestein ausgewiesene Einheiten werden im Folgenden lithologisch beschrieben:

Hettangium: bituminöse, karbonatische Tonsteine sowie Kalk- und Mergelsteine (Grabert 1998a).

Sinemurium: im unteren Teil kommt ein dickbankiger, oolithischer, teilweise konglomeraticher Kalkstein vor (Grabert 1998a) der überlagert wird von einer Abfolge aus Ton- und Mergelstein, z. T. feinsandig, z. T. mit Kalk- oder Kalksandsteinbänken sowie Tonsteingeoden (marin) (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016).

Das Pliensbachium ist ebenfalls aufgebaut aus Ton- und Mergelstein, z. T. feinsandig, z. T. mit Kalk- oder Kalksandsteinbänken sowie Tonsteingeoden (marin) (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016).

Das Toarcium kann in die Einheiten Posidonienschiefer und Jurensismergel untergliedert werden (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016).

Die Abfolge des Posidonienschiefer ist durch Tonsteine charakterisiert, die zum Teil merglig, blättrig und/oder bituminös ausgebildet sind. Den oberen Teil des Toarcium bilden die Jurensismergel: Ton- und Mergelstein, z. T. feinsandig, z. T. mit Kalk- oder Kalksandsteinbänken sowie Tonsteingeoden (marin) (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016).

Mächtigkeit

Mit dem Unterjura stellten sich wieder marine Verhältnisse ein und damit verbunden war die Ablagerung von Tongesteinen, die im Westen Norddeutschlands, in rheinisch streichenden Senkungszonen, bis 1400 m mächtig werden (Feldrappe 2006).

Tongesteine des Hettangium haben eine Mächtigkeit zwischen 10 m und 30 m. Die Mächtigkeit der übrigen Abfolge des Lias in Nordrhein-Westfalen variiert zwischen 150 m und 500 m (Grabert 1998a).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 132). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Wurden vom Geologischen Dienst NRW GIS-Dateien der Verbreitung von Tongesteinen der Lias-Dogger-Abfolge innerhalb des Teufenbereiches zwischen 300 m und 2.000 m geliefert (DokID_11842255/141/9367). Zudem erging der Hinweis darauf, dass diese vorgeschlagenen Gebiete auf dem „Geologischen 3D-Landesmodell“ basieren, das für weite Teile von NRW als grobe Übersichtsdarstellung vorliegt.

Die durch den geologischen Dienst von Nordrhein-Westfalen (GD NRW) bereitgestellten Informationen zur Verbreitung geeigneter Tongesteinshorizonte in Nordrhein-Westfalen (NRW) wurden hinsichtlich ihrer Nachvollziehbarkeit geprüft. Die Nachvollziehbarkeit der gelieferten Shape-Dateien wurde anhand von durch den GD Nordrhein-Westfalen übermittelten Bohrungen sowie dem geologischen Landesmodell NRW bewertet.

Die Plausibilitätsprüfung des Kriteriums Teufenlage erfolgt anhand eines Vergleichs der übergebenen Shape-Dateien. Hierfür wurde die Basisfläche des Lias & Dogger mit der Basisfläche des Jura des Landesmodells NRW verglichen. Die Topfläche des Tongesteinshorizontes Lias & Dogger (Parkinsoni-Schichten) liegt innerhalb des Mitteljura. Diese Fläche ist im Landesmodell nicht abgebildet, so dass keine geeignete Fläche für einen Vergleich vorhanden ist. Die Bohrungsdatenbank enthält Angaben zur Basis des

Unter-, Mittel- und Oberjura. Auch hier kann lediglich die Angabe zur Basis des Unterjura für eine Prüfung der Shape-Dateien herangezogen werden. Daher wird die gelieferte Fläche als nicht nachvollziehbar eingestuft. Die Ausweisung von Gebieten, die alle Mindestanforderungen erfüllen, erfolgt nach dem Konzept der Anwendung der Mindestanforderungen der BGE (siehe Kapitel 6 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j).

Tabelle 132: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales-Gelände- Modell
3	NW	GD NRW	11883267/ 8849	ts	Landesmodell_NRW	3D-Landesmodell von NRW
4	DE	BGR	11844870_ 01/ 6846	pdf	BGR_Tonstu- die2007	PDF-Bericht Tonstu- die (Hoth et al. 2007)
5	DE	BGR	11897915_ 02/9574/24 93968	pdf	Feld- rappe_2006_Tonge- steinsinformationen jm NWD_2020	Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2006)
6	DE	BGR	11897915_ 02/9575/24 93968	tif	Anlage-1	Verbreitung des Mit- teljura mit ausge- wählten Bohrungen in NW – Deutsch- land. Aus dem Zwi- schenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2006)
9	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Norddeutsch- land_West	Bohrdatenbank Ton- studie (Hoth et al. 2007)
10	NW	GD NRW	11842255/ 7535	shp	Lias_Dogger_b_ct	Basis der Einheit Lias-Dogger, vom GD NRW ausgewie- senes Gebiet, in dem die MA erfüllt sind

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Beschreibung
11	NW	GD NRW	11842255/ 7536	shp	Lias_Dogger_t_ct	Top der Einheit Lias-Dogger, vom GD NRW ausgewiesenes Gebiet, in dem die MA erfüllt sind
12	NW	GD NRW	11842255/ 7537	shp	Lias_Dogger_Verbreitung	Gelieferte Verbreitungsgrenze innerhalb der die MA erfüllt sind (Lias-Dogger)
13	NW	GD NRW	11842255/ 9367	pdf	2018_06_25_BGE_Datenlieferung_Mindestanforderungen_Antwortschreiben_Anlagen	Anschreiben zur Datenlieferung MA des GD NRW
14	NW	GD NRW	11883267_ 02/8852	mdb	Bohrung_NRW	Bohrdatenbank

Eigenrecherche

Thematische Karten

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

Barth, G. (2019): Stratigraphie, Fazies und geothermisches Potenzial von fluvio-deltaischen Ablagerungsräumen der Oberen Trias und des Unteren Jura im östlichen Teil des Mitteleuropäischen Beckens, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, S. 225, Freiberg (Barth 2019)

1. Biofacies reconstructions for the Early Hettangian–Early Sinemurian. Continental highs are after Ziegler (1990). Biofacies reconstructions for: (a) the maximum flooding of the initial transgression in the Early Hettangian Planorbis Chronozone; (b) the maximum flooding of the transgression in the Middle Hettangian Liasicus Chronozone; (c) the maximum regression of the regression in the Late Hettangian Angulata Chronozone; and (d) the maximum flooding of the initial second-order transgression in the Early Sinemurian Semicostatum Chronozone. (822335 (F.4_Angulata); 822336 (F.4_Liasicus); 822337 (F.4_Planorbis); 822338 (F.4_Semicostatum))

2. Biofacies reconstructions for the Early Sinemurian–Early Pliensbachian. Continental highs are after Ziegler (1990). Biofacies reconstructions for: (a) the maximum regression of the second-order regression in the late Early Sinemurian Turneri Chronozone; (b) the maximum flooding of the transgression in the Late Sinemurian Obtusum–Oxynotum Chronozone; (c) the maximum regression of the regression in the Late Sinemurian Raricostatum Chronozone; and (d) the maximum flooding of the second-order transgression in the Early Pliensbachian Jamesoni–Ibex Chronozone. 822339 (F.5_Jamesoni); 822340 (F.5_Obtusum); 822341 (F.5_Raricostatum); 822342 (F.5_Turneri))
3. Biofacies reconstructions for the early Late Pliensbachian–Early Toarcian. Continental highs are after Ziegler (1990). Biofacies reconstructions for: (a) the maximum regression of the second-order regression in the early Late Pliensbachian Margaritatus Chronozone (Stokesi Subchronozone); (b) the maximum flooding of the transgression in the Late Pliensbachian Spinatum Chronozone (Apyrenum Subchronozone); (c) the maximum regression of the regression in the latest Pliensbachian Spinatum Chronozone (latest Hawskerense Subchronozone); and (d) the maximum flooding of the first-order transgression in the Early Toarcian Tenuicostatum–Serpentinum Chronozone. (822343 (F.6_LowerToarcian); 822344 (F.6_Margaritatus); 822345 (F.6_SpinatumI); 822334 (F.6_SpinatumII))

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Lias und Dogger in Nordrhein-Westfalen geprüft wurde, ist in Tabelle 133 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 133: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Unterkreide aus der Basisfläche Unterkreide	b_Lias-Dogger_NW.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Lias-Dogger_NW_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Lias-Dogger_NW_MACRORESULT_qs.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_ju-jm_NW.dxf MG_t_ju-jm_NW.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	Tonstudie_Lias_NDB
i) Import der Fläche aus 2h als DXF in ArcGIS Pro	
j) Separieren der Fläche in Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Trennen“	MG_t_ju_final.shp
k) Entfernen aller Flächen mit einer Fläche kleiner als 10 km ² und Benennung der Gebiete	MG_t_ju_final_Kopie.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 133 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell NRW ist ein Übersichtsmodell dessen Grundlage häufig auf Ergebnissen aus unterschiedlichen Projekten beruht, deren Ergebnisflächen untereinander nicht konsistent abgestimmt wurden. Datenbasis und somit die Genauigkeit sind regional sehr unterschiedlich. Die Basisflächen Karbon Basis, Mitteldevon Basis, sowie die Einheiten „Emscher Formation“ und „Wealden Formation“ wurden nicht vollständig modelliert und sind lediglich angenäherte Darstellungen, um eine ungefähre Vorstellung von Tiefenlage und Mächtigkeit zu vermitteln.

Das Landesmodell weist eine Top- und elf Basisflächen für stratigraphische Einheiten sowie jeweils eine Top- und Basisfläche für Formationen auf:

- gg_q_b (Quartär Basis)
- gg_t_b (Tertiär Basis)
- gg_kroha_b (Halterner Sande Basis)
- gg_kro_b (Oberkreide Basis)
- gg_kr_b (Kreide Basis)
- gg_j_b (Jura Basis)
- gg_tr_b (Trias Basis)
- gg_z_b (Zechstein Basis)

- gg_r_b (Rotliegend Basis)
- gg_praep_t (Präperm Top)
- gg_c_b (Karbon Basis, unvollständig)
- gg_dm_b (Mitteldevon Basis, unvollständig)

Formationen:

- Emscher_Form_t (Emscher Formation Top, unvollständig)
- Emscher_Form_b (Emscher Formation Basis, unvollständig)
- Wealden_t (Wealden Top, unvollständig)
- Wealden_b (Wealden Basis, unvollständig)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 133 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Lias-Dogger wurde aus dem Landesmodell die Fläche „Jura Basis (gg_j_b)“ verwendet, da das Landesmodell keine interne Differenzierung des Jura beinhaltet.

Das digitale Geländemodell für Nordrhein-Westfalen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 133, Nr. 2a – e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Lias-Dogger sowie der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen der Unterkreide, der Oberkreide, des Tertiär und Quartär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 133, 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche Lias-Dogger wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 – 1500 m u. GOK) eingehalten werden. Des Weiteren wurde die Plausibilität der Bearbeitungsfläche Lias-Dogger anhand von 2D-Profilschnitte kontrolliert. Die Bearbeitungsfläche Lias-Dogger wurde mit der Verwaltungsgrenze

VG250 verschnitten und auf Bereiche innerhalb Nordrhein-Westfalens beschränkt (Tabelle 133, 2g).

Die Bearbeitungsfläche Lias-Dogger wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 133, 2h).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der gesamte Datensatz in einzelne Flächen getrennt, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft werden konnte. Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt, mit Ausnahme von Gebieten, die an der Grenze zu Niedersachsen liegen und dort fortgeführt werden.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Feldrappe 2006; Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011; Reinhold et al. 2013; Barth 2019) herangezogen und Bohrdaten, hauptsächlich Schichtenverzeichnisse aus den in Tabelle 132 aufgelisteten Bohrdatenbanken, auf die lithologischen Abfolgen des Unteren Jura geprüft.

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bildet „Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen“ (Grabert 1998a). Unterstützend finden verschiedene Studien wie die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2013) sowie das Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland (Reinhold et al. 2011) Anwendung. Diese Studien wurden zur Beurteilung der mit dem 3D-Modell erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse vom Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW) wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Lias geprüft. Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt ist.

Außerdem wurden die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Hettingium, Sinemurium, Plinsbachium und Toarcium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Landesgrenze von Nordrhein-Westfalen geprüft.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeiten und Tonanteils-Klassen zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit teilweise oder nicht erfüllt ist.

Bohrungsdaten (Gronau DEA 2/1952, Salzbergen Altenrheine 2/1951, Ellerburg Z1/1967, Rahden Z1/1982) der Tonstudie bestätigen das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit einem Tonanteil von 60 % – 80% in den ausgewiesenen Gebieten (Hoth et al. 2007).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Unterjura in den verbleibenden Gebieten in Nordrhein-Westfalen **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Lias-Dogger wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Jura inklusive Lias zusammen. Keine der Bohrungen der Tonstudie von Hoth et al. (2007), die die ausgewiesenen Gebiete abdecken, zeigen eine Mindestmächtigkeit der Lias Abfolge von 100 m an. Die Auswertung der der BGE vorliegenden Schichtenverzeichnisse vom Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW) zeigt jedoch bei 2 Bohrungen (Gronau DEA 1 und Ellerburg Z1), die in den ausgewiesenen Gebieten liegen, Tonformationen des Unterjura mit Mindestmächtigkeiten von 100 m an. Aus diesem Grund wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Lias wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK (und oberhalb von 1500 m u. GOK) erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt.

Des Weiteren wurden Bohrdaten hinsichtlich der Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m unter der Geländeoberkante geprüft. 4 Bohrungen (Gronau DEA 2/1952, Salzbergen Altenrheine 2/1951, Ellerburg Z1/1967, Rahden Z1/1982) der Tonstudie von Hoth et al. (2007); die die ausgewiesenen Gebiete abdecken, zeigen im Lias Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m an.

Ergänzend zeigen die Auswertung der der BGE vorliegenden Schichtenverzeichnisse der Landes-Bohrdatenbank vom GD NRW bei zwei Bohrungen, Gronau DEA 1 und Ellerburg Z1, in den ausgewiesenen Gebieten Lias-Tonformationen an, die die Mindestanforderungen der Teufenlage erfüllen. Aus diesem Grund wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für die verbleibenden Gebiete als zunächst **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D -Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Nordrhein-Westfalen können Gebiete ausgewiesen werden, in denen die Formationen des Lias nicht alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell vorgestellt (Abbildung 58).

Ergebnis

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 58 ist das Ergebnis der Anwendung der Mindestanforderungen für die Einheit Unterkreide dargestellt.

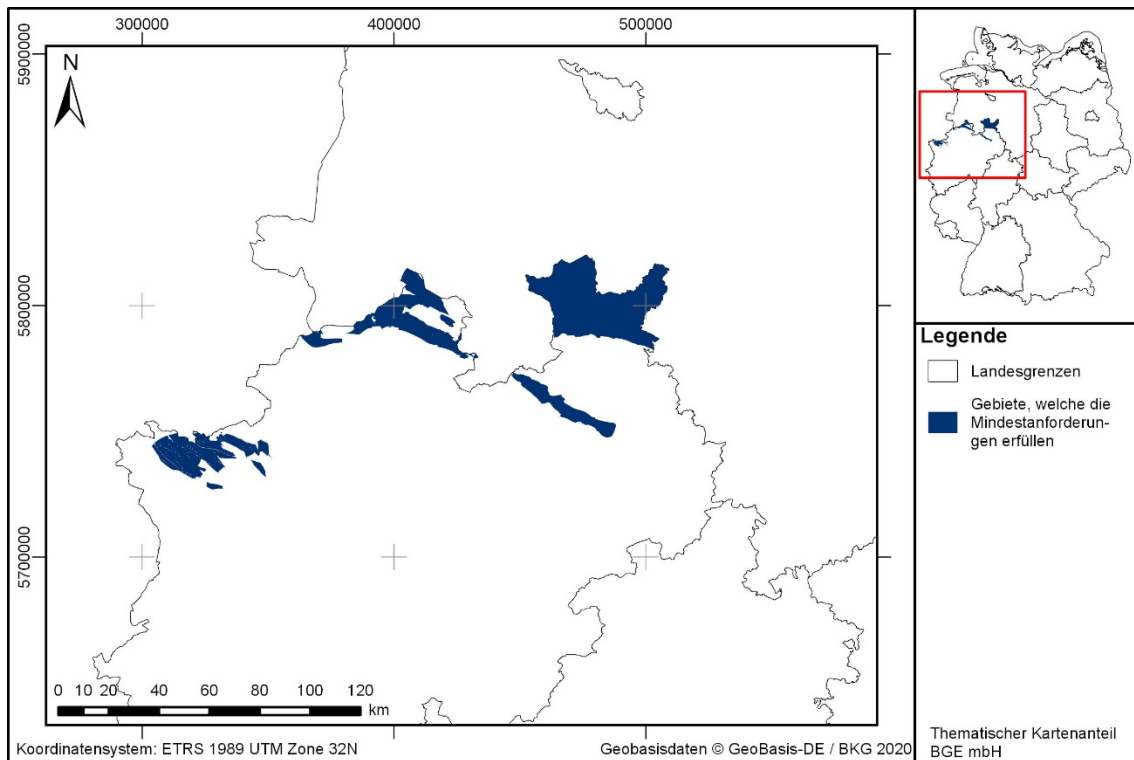


Abbildung 58: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein Lias in Nordrhein Westfalen. Die Landesgrenzen sind in schwarz abgebildet. Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, sind in blau dargestellt.

Eine Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, inklusive ihrer Fläche, findet sich in Tabelle 134.

Tabelle 134: Auflistung alle Mindestanforderungen erfüllender Gebiete

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_ju_NW_1	478
MG_t_ju_NW_2	1104
MG_t_ju_NW_3	248
MG_t_ju_NW_4	219
MG_t_ju_NW_5	29
MG_t_ju_NW_6	33
MG_t_ju_NW_7	54
MG_t_ju_NW_8	16
MG_t_ju_NW_9	56
MG_t_ju_NW_10	20

MG_t_ju_NW_11	12
MG_t_ju_NW_12	15
MG_t_ju_NW_13	16
MG_t_ju_NW_14	14
MG_t_ju_NW_15	11
MG_t_ju_NW_16	2

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 135 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 135: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11883267	8849		Landesmodell_NRW	3D-Landesmodell von NRW	11883267
11884574	8906	2385811	Norddeutschland_West	Gronau DEA 2/1952, Salzbergen Altenrheine 2/1951, Ellerburg Z1/1967, Rahden Z1/1982	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
11883267_02	8860	2384532	Schichtenverzeichnisse.pdf	Gronau DEA 1 Ellerburg Z1	Analysierte Schichtenverzeichnisse zu Bohrungen aus der Bohrdatenbank NRW

1.3.11 Unterjura – Mecklenburg-Vorpommern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Unterjura (Lias), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Mecklenburg-Vorpommern.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Liegt kein 3D-Modell vor, wie im Fall von Mecklenburg-Vorpommern, erfolgt die Auswertung mittels thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und anhand von Bohrungsdaten.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Unterjura (Lias)

Der Unterjura, der mit der informellen Bezeichnung Lias in Norddeutschland vertreten ist, kann in folgende Stufen untergliedert werden: Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium. Alle Stufen sind in Mecklenburg-Vorpommern verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden in Mecklenburg-Vorpommern die Stufen Hettangium, Ober-Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Lias und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Mecklenburg-Vorpommern entnommen werden (vgl. Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Der Lias ist nahezu flächendeckend in Mecklenburg-Vorpommern verbreitet. Im Nordteil der Insel Rügen sind keine Sedimentgesteinsabfolgen des Lias vorhanden (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e), da im Unterjura vermutlich keine Sedimentation in diesem Gebiet erfolgte (Petzka et al. 2004). Aufgrund kre-tazischer Erosion fehlen höhere Teile des Lias zudem in Nordwest-Mecklenburg sowie

im Raum Rostock-Malchin-Barth. Im Umfeld von Salzstöcken und Salzkissen weisen die Sedimentgesteinsabfolgen des Lias häufig eine geringere Mächtigkeit auf oder fehlen teils vollständig (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e).

Fazies/Ablagerungsraum

Am Übergang der Trias zum Jura erfolgen aus westlicher Richtung marine Transgressionen in das Norddeutsche Becken, welche ihre größte ostwärts gerichtete Ausdehnung im Pliensbachium erreichen (Barth et al. 2018). Insgesamt ist der Lias gekennzeichnet durch eine Abfolge mariner Transgressionen und Regressionen. Der Westteil des Norddeutschen Beckens stellt im Lias größtenteils einen marinen Faziesraum dar, welcher durch die Ablagerung vorwiegend toniger Sedimente gekennzeichnet ist (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e). Im Ostteil dominierten vornehmlich limnisch-brackische Bedingungen. Dieser Ablagerungsraum wurde durch den Eintrag sandiger, terrigener Sedimente des Fennoskandischen Schilds (Petzka et al. 2004) und des Böhmisches Massivs beeinflusst (Paul et al. 2008). Generell ist das Norddeutsche Becken im Lias geprägt durch eine vorwiegend tonige Beckenfazies im Westen sowie durch die Ablagerung sandiger Sedimente im Ostteil des Beckens und in Küstennähe, als Teil der Beckenrandfazies (Hoth et al. 2007; Lott et al. 2010; Barth et al. 2018).

Lithologie

Die Sedimentgesteinsabfolgen des Hettangium werden von schluffigen Tonsteinen mit wenigen Feinsandstein-Bänkchen aufgebaut. Nach Osten nimmt der Sandgehalt stark zu (Petzka et al. 2004).

Das Unter-Sinemurium besteht aus fossilführenden, sandigen Schluffsteinen (Petzka et al. 2004). Da es keine Tongesteinsabfolgen enthält, wird es nicht weiter behandelt. Das Ober-Sinemurium wird im Westteil Mecklenburg-Vorpommerns ebenfalls von feinsandigen Schluffsteinen aufgebaut, in Richtung Osten schalten sich jedoch Tonsteine ein (Petzka et al. 2004). Im Raum Barth-Grimmen wird folgende Abfolge angetroffen: (1) liegender Kalkschluffstein- bis Feinsandstein, (2) Tonsteine, (3) Feinsandstein-Zwischenmittel, (4) obere Tonsteine (Petzka et al. 2004). Im östlichen Vorpommern wiederum ist das gesamte Ober-Sinemurium sandig-schluffig ausgebildet.

Die Basis des Unter-Pliensbachium bildet ein Glaukonit führender Basissandstein. Darüber folgt eine Abfolge von kalkhaltigen Tonsteinen, Schluffsteinen und geringmächtigen Sideritbänken (Petzka et al. 2004). Das Ober-Pliensbachium besteht aus mergeligen Tonsteinen und Schluffsteinen, die nach Osten sowie zum Hangenden zunehmend sandiger ausgeprägt sind (Petzka et al. 2004).

Die Posidonieschiefer-Formation des Unter-Toarcium besteht aus einem bituminösen, blättrigen und meist kalkhaltigen Tonstein (Petzka et al. 2004).

Die Grüne-Serie wurde ebenfalls im Unter-Toarcium abgelagert und besteht aus fetten, selten schluffigen Tonen (Petzka et al. 2004). In Vorpommern tritt im Hangenden der

tonigen Abfolge eine Wechsellagerung von Tonen und Schluffen mit Feinsanden auf. In SW-Mecklenburg setzt die Grüne Serie als Faziesvertretung des Posidonienschiefers ein. Der Ablagerungsraum der Grünen Serie erstreckt sich ausgehend von Südwest-Mecklenburg über den gesamten Nordosten Deutschlands.

Der Dörntener Schiefer des Ober-Toarcium wird von bituminösen, blättrigen Tonsteinen aufgebaut, welche von Tonen und Schluffen überlagert werden, welche lagenweise Eisen-Oolithe enthalten (Petzka et al. 2004). Der Dörntener Schiefer wird in Südwest-Mecklenburg angetroffen.

Mächtigkeit

Die durchschnittliche Gesamtmächtigkeit des Lias beträgt 350 m bis 550 m. Im Gebiet zwischen Ludwigslust und Perleberg sowie nordwestlich von Dömitz weist der Lias maximale Mächtigkeiten von über 600 m auf (Petzka et al. 2004).

Die Mächtigkeit des Hettangium beträgt durchschnittlich 80 m – 120 m. Im Südwesten Mecklenburgs, an der Grenze zu Schleswig-Holstein, erreichen die Sedimentgesteinsabfolgen des Hettangium Mächtigkeiten von 165 m (Petzka et al. 2004).

Die Mächtigkeit des Unter-Sinemurium beträgt 20 m – 40 m und die Mächtigkeit des Ober-Sinemurium variiert zwischen 40 m und 70 m (Petzka et al. 2004). Für das Sinemurium ergibt sich hieraus eine Gesamtmächtigkeit von 60 m – 110 m.

Die Mächtigkeit des Unter-Pliensbachium schwankt zwischen 2 m – 60 m. Diese beträchtliche Variationsbreite ist wahrscheinlich auf eine bestehende Schichtlücke zum unterlagernden Sinemurium in weiten Teilen Mecklenburg-Vorpommerns zurückzuführen, welche im Südwesten und Westen von Mecklenburg jedoch nicht ausgebildet ist (Petzka et al. 2004). Die Mächtigkeit des Ober-Pliensbachium beträgt durchschnittlich 80 m – 130 m, nördlich von Greifswald wurden Mächtigkeiten über 150 m nachgewiesen (Petzka et al. 2004). Hieraus lässt sich eine Gesamtmächtigkeit für das Pliensbachium von 82 m bis größer als 210 m ableiten.

Die Posidonienschiefer-Formation des Unter-Toarcium weist eine Mächtigkeit von bis zu 70 m in Südwest-Mecklenburg auf, welche in Richtung Osten sehr schnell abnimmt (Petzka et al. 2004). Die Grüne-Serie wurde ebenfalls im Unter-Toarcium abgelagert und weist eine Mächtigkeit von 5 m – 30 m auf (Petzka et al. 2004). Der Dörntener Schiefer des Ober-Toarcium besitzt Mächtigkeiten von bis zu 50 m (Petzka et al. 2004). Die Gesamtmächtigkeit des Toarcium beträgt gewöhnlich 80 m – 120 m (Petzka et al. 2004). In den Randsenken des Diapirs Möckow und des Salzkissens Marnitz werden jedoch Mächtigkeiten mehr als 150 m erreicht.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 136). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 136: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BGR	11844870_ 01/6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
3	DE	BGR	11897915_ 02/9557	pdf	RegionaleTonstudie_OASYS	Regionale Tonstudie 2001 inkl. Anlagen 12 und 13
4	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Norddeutschland_Ost	Bohrdatenbank Tonstudie
5	MV	LUNG	11888776/ 9164	mdb	LUNG_SVZ_Kurz_2 020_02_06	Schichtenverzeichnisse Bohrdatenbank MV

Eigenrecherche

Thematische Karten

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

Hoth, P., Schulz, P., Fischer, M. & Krull, P. (2001): Regionale Tonstudie. Berlin und Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

Anlage 12: Tiefenlage der Oberfläche des Lias in Norddeutschland

Anlage 13: Mächtigkeit des Lias in Norddeutschland

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): Lias: Hettang + Untersinemur. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): Lias: Obersinemur + Carix. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): Lias: Domer. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): Lias: Toarc. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Lias in Mecklenburg-Vorpommern geprüft wurde, ist in Tabelle 137 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 137: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Georeferenzierung der in Kapitel 3.2 aufgeführten thematischen Karten	Hettang_Toarc_ZGI_1975.tif Hettang_Untersinemur_ZGI_1975.tif Obersinemur_Carix_ZGI_1975.tif Domer_ZGI_1975.tif Toarc_ZGI_1975.tif Tiefenlage_Lias_BGR_2001.tif Maechtigkeit_Lias_BGR_2001.tif
b) Vektorisierung der Verbreitungsgebiete der Stufen des Lias mit günstiger fazieller Ausprägung anhand der lithologisch-paläogeographischen Karten von (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e)	
c) Erweiterung der Gebiete auf Grundlage der Mächtigkeitskarte des Lias aus Anlage 13 von Hoth et al. (2001)	
d) Entfernen von Bereichen in denen die Oberfläche des Lias in größer 1500 m u. GOK auftritt, basierend auf der Kartendarstellung aus Anlage 12 von Hoth et al. (2001)	
e) Überprüfung und Anpassung der Gebiete anhand der Geodaten der Bohrdatenbank der Tonstudie von Hoth et al. (2007) und der Schichtenverzeichnisse der Bohrdatenbank MV des LUNG	
f) Entfernen aller Gebiete mit einer Fläche kleiner als 10 km ² und Benennung der Gebiete	MV_Lias_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern steht für die Tongesteine des Lias kein Geomodell zur Verfügung, sodass die Anwendung der Mindestanforderungen ausschließlich auf der Basis thematischer Karten, Bohrungen und Literaturangaben beruht.

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Zur Ausweisung von identifizierten Gebieten im Tongestein des Lias in Mecklenburg-Vorpommern wurden ausgewählte Verbreitungskarten georeferenziert und vektorisiert. Die verwendeten Karten sind in Kapitel 3.2 aufgelistet. Aus diesen Karten wurden die Verbreitungsgrenzen sowie die Grenzen der tonigen Lithofazies vektorisiert. Dabei wurden jeweils die Karten zur Verbreitung der Stufen (bzw. Verbreitung der tonigen Fazies des Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium) übereinandergelegt und die maximale Verbreitung anhand der Verbreitungsgrenzen vektorisiert. Die resultierenden Flächen wurden auf die Mächtigkeit und Tiefenlage des Lias hin überprüft und angepasst. Hierfür wurden die Kartendarstellungen aus Hoth et al. (2001), die Bohrdatenbank der Tonstudie von Hoth et al. (2007) und die Schichtenverzeichnisse der Bohrdatenbank des LUNG verwendet. Die Flächen wurden auf die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ von 10 km² geprüft und kleinere Gebiete ggf. entfernt.

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bildet die „Geologie von Mecklenburg-Vorpommern“ zur Verbreitung des Lias in Mecklenburg-Vorpommern (Petzka et al. 2004). Unterstützend findet die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), sowie deren Zwischenbericht von 2001 Anwendung (Hoth et al. 2001). Diese Studien wurden zur weiteren Beurteilung der mit dem verwendeten Kartenmaterial erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Lias geprüft.

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK innerhalb der Landesgrenzen von Mecklenburg-Vorpommern geprüft. Zehn Bohrungen erfüllen dabei die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in den auf Grundlage des Kartenmaterials ausgewiesenen Flächen. Es handelt sich hier um die Bohrungen Marnitz-Süd 1/59, Schlieven 3/58, Schlieven 110/61, Schlieven 101/61, Marnitz 9/67, Ludwigslust 6 a/60, Ludwigslust 4/59, Marnitz Ost 101/64, Conow-Ludwigslust 2/72 und Dömitz 5/60. In den vorgenannten Bohrungen wurden die Stufen des Lias innerhalb der Tiefenlage von 300 m – 1500 m u. GOK mit Tonanteilen zwischen

60 % – 80 %, teils größer als 80 %, und einer kumulativen Mächtigkeit zwischen 151 m und 277 m erbohrt.

Bei der Auswertung der Schichtenverzeichnisse des LUNG, welche der BGE vorliegen, wurden in den relevanten Regionen vier Bohrungen identifiziert, in denen Tonformationen des Lias in Tiefenlagen zwischen 300 m bis 1500 m u. GOK und mit kumulativen Mächtigkeiten von mindestens 100 m erbohrt wurden. Es handelt sich hier um die Bohrungen Kb KSS 4/1966, E Sternberg 1/1h/1961, E Ganzow 1/1h/1978 und E Dömitz 9/9a/1961. Eine Lias-Fläche im Süden Mecklenburg-Vorpommerns, welche zunächst anhand thematischer Karten ausgewiesen wurde, konnte aufgrund der Tiefenlage des Lias in den Bohrungen E Gorlosen 2/1956, E Gorlosen 5/1957, E Gorlosen 6/1957 und E Gorlosen 8/1957 ausgeschlossen werden. In den vier genannten Bohrungen wurden die Abfolgen des Lias in Tiefenlagen größer als 1422 m u. GOK erbohrt. Die anhand der Bohrungen ausgeschlossene Lias-Fläche erfüllt somit nicht die Mindestanforderung bezüglich einer kumulativen Mächtigkeit von mindestens 100 m in der Tiefenlage zwischen 300 bis 1500 m u. GOK.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeiten und Tonanteils-Klassen zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit teilweise oder nicht erfüllt ist.

Wie aus der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) zu entnehmen ist, sind die Tongesteinsformationen des Lias heterogen aufgebaut. Die Formationen werden vorwiegend von Tonstein- und Schluffsteinabfolgen gebildet, welche teils bituminös, feinsandig, kalkhaltig oder mergelig ausgeprägt sind und vereinzelt Feinsandstein-Zwischenmittel enthalten. Anhand lithologisch-paläogeographischer Karten des ZGI (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e) konnten im Westen Mecklenburg-Vorpommerns tonige Faziesbereiche identifiziert werden.

Weiterhin bestätigen Bohrungsdaten der Tonstudie (Marnitz-Süd 1/59, Schlieven 3 /58, Schlieven 110 /61, Schlieven 101/61, Marnitz 9/67, Ludwigslust 6a/60, Ludwigslust 4/59, Marnitz Ost 101/64, Conow-Ludwigslust 2/72 und Dömitz 5/60) das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit einem Tonanteil von 60 % – 80 % und teils größer als 80 % in den ausgewiesenen Gebieten zumindest teilweise (Hoth et al. 2007).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Unterjura in den verbleibenden Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wurde, da die Gebiete nicht durch 3D-Modelle abgedeckt sind, anhand von Bohrdaten der Tonstudie und Schichtenverzeichnissen der Bohrdatenbank des LUNG hinsichtlich der Mächtigkeiten der Tongesteinsformationen des Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium überprüft. Eine thematische Karte zur Mächtigkeit des Lias aus Hoth et al. (2001) wurde ebenfalls berücksichtigt. Da die thematische Karte von Hoth et al. (2001) sowie insgesamt fünfzehn Bohrungen in den verbleibenden Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern für die Tongesteinsformationen des Lias (kumulative) Mächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Für alle ausgewiesenen Flächen wurden Bohrdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007), sowie der Bohrdatenbank des LUNG hinsichtlich der Tiefenlage der Tongesteinsformationen des Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium überprüft. Thematische Karten zur Mächtigkeit und Tiefenlage des Lias aus Hoth et al. (2001) wurden ebenfalls berücksichtigt. Auf Basis der vorliegenden Daten kann zum aktuellen Zeitpunkt keine weitere Eingrenzung vorgenommen werden. Mit insgesamt fünfzehn Bohrungen der Tonstudie und der Bohrdatenbank des LUNG wurden in den ausgewiesenen Flächen in Mecklenburg-Vorpommern Tongesteinsformationen des Lias in Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m u. GOK erbohrt. Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für die verbleibenden Gebiete Mecklenburg-Vorpommerns wird daher als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Mecklenburg-Vorpommern können Gebiete ausgewiesen werden, in denen die Formationen des Lias alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell vorgestellt (Abbildung 59).

Ergebnis

In Abbildung 59 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Lias in Mecklenburg-Vorpommern dargestellt. Ein geologischer Profilschnitt im Bereich von SW-Mecklenburg ist in Abbildung 60 dargestellt. Das Profil gibt exemplarisch die geologische Situation im Umfeld der Gebiete wieder, welche die Mindestanforderungen erfüllen. In Tabelle 138 werden die Gebiete aufgeführt, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

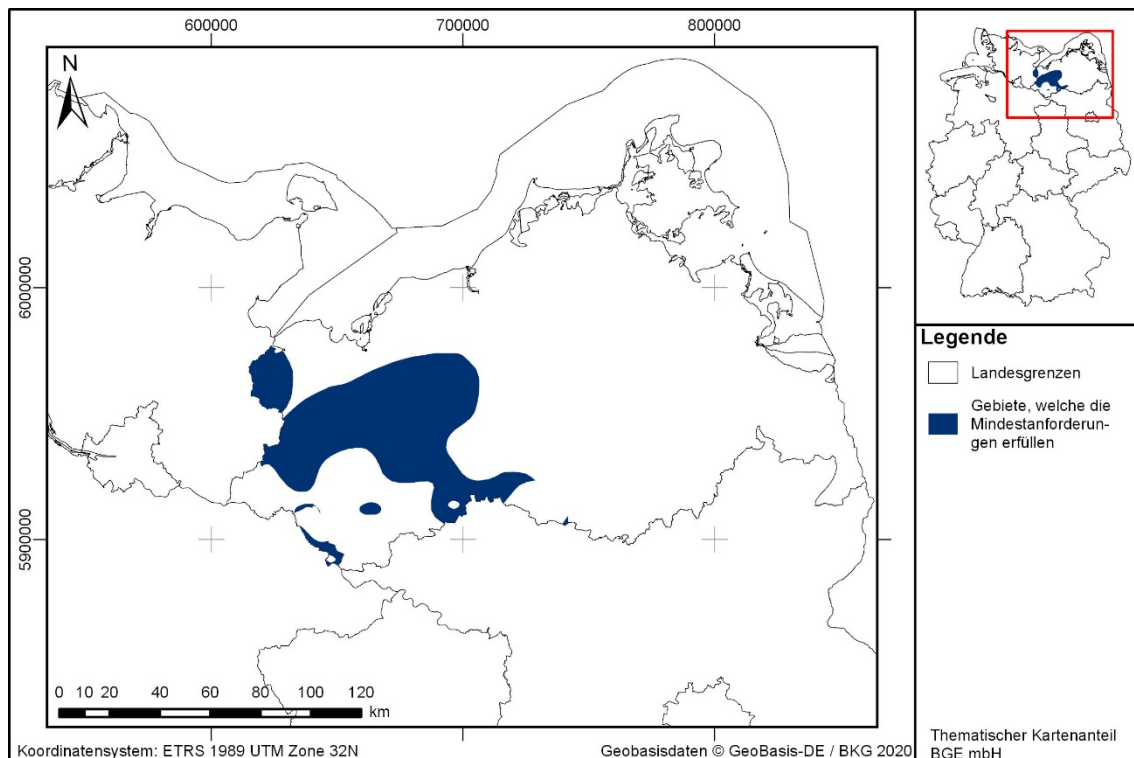


Abbildung 59: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für die Tongesteinsformationen des Lias in Mecklenburg-Vorpommern

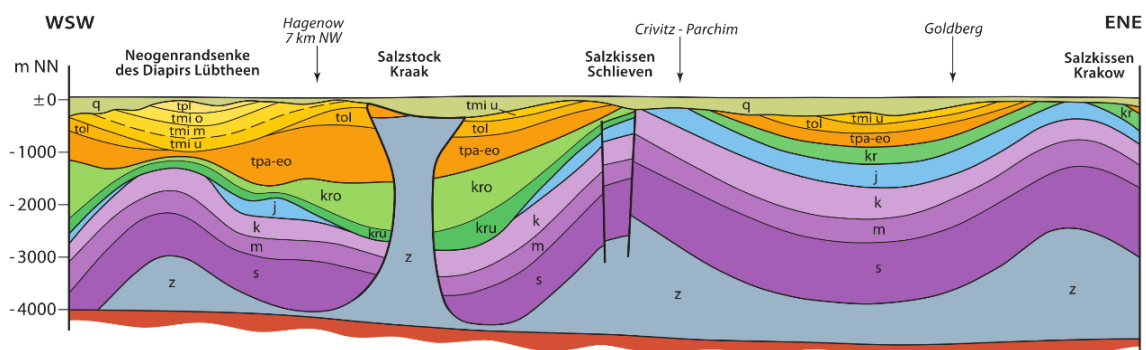


Abbildung 60: Geologischer Schnitt in Südwest-Mecklenburg, durch verschiedene Zechstein-Salzstrukturen (z) und das Deckgebirge, welches die Abfolgen des Jura (j) beinhaltet (Müller & Obst 2008)

Tabelle 138: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km², befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_ju_MV_1	34
MG_t_ju_MV_2	14
MG_t_ju_MV_3	324
MG_t_ju_MV_4	3344
MG_t_ju_MV_5	66
MG_t_ju_MV_6	4

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 139 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 139: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11884574	8906	2385810	Nord- deutsch- land_ Ost	Marnitz-Süd 1/59, Schlieven 3 /58, Schlieven 110 /61, Schlieven 101 /61, Marnitz 9/67, Ludwigslust 6 a/60, Ludwigslust 4 /59, Marnitz Ost 101 /64, Conow-Ludwigslust 2/72, Dömitz 5/60	Bohrdatenbank Tonstudie
11888776	9164	2454084	LUNG_SV Z_Kurz_20 20_02_06	Kb KSS 4/1966, E Sternberg 1/1h/1961, E Ganzow 1/1h/1978, E Dömitz 9/9a/1961, E Gorlosen 2/1956, E Gorlosen 5/1957, E Gorlosen 6/1957, E Gorlosen 8/1957	Schichtenverzeichnisse Bohrdatenbank MV
11897915	9557		Regionale- Tonstu- die_OASY S	Anlage 12: Tiefenlage der Oberfläche des Lias in Norddeutschland (Tiefenla- ge_Lias_BGR_2001.tif, SG02102/7-1/30-2020#25, 819537) Entscheidungserhebliches Datum: Tiefenlage der Lias-Oberfläche >1500 m.	Hoth, P., Schulz, P., Fi- scher, M. & Krull, P. (2001): Regionale Ton- studie. Berlin und Han- nover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
11897915	9557		Regionale- Tonstu- die_OASY S	Anlage 13: Mächtigkeit des Lias in Norddeutschland (Maechtig- keit_Lias_BGR_2001.tif, SG02102/7-1/30-2020#25, 819848) Entscheidungserhebliches Datum: Mächtigkeit des Lias größer 100 m	Hoth, P., Schulz, P., Fi- scher, M. & Krull, P. (2001): Regionale Ton- studie. Berlin und Han- nover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

Entscheidungserhebliche thematische Karten

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias. (SG02102/7-1/30-2020#25, 819518)
Entscheidungserhebliches Datum: Sekundäre Ausbißlinien des Hettang, Obersinemur, Domer und Toarc; Ostgrenze des marinen, überwiegend tonigen Hettang/Untersinemur; Verbreitung der am stärksten marin beeinflussten Sedimente im Obersinemur/Carix; Verbreitung der Sandführung im Domer; Westgrenze der Verbreitung der Grünen Serie; Ostgrenze der Verbreitung des Posidonienschiefers.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): Lias: Hettang + Untersinemur. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias. (SG02102/7-1/30-2020#25, 819509)

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): Lias: Obersinemur + Carix. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias. (SG02102/7-1/30-2020#25, 819527)

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): Lias: Domer. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias. (SG02102/7-1/30-2020#25, 819528)

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): Lias: Toarc. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias. (SG02102/7-1/30-2020#25, 819529)

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

1.3.12 Unterjura – Rheinland-Pfalz

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheiten der Stufe Lias, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet Rheinland-Pfalz. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommt für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Jura die Opalinuston-Formation an der Basis des Mittleren Jura (Dogger α) in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Rheinland-Pfalz, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang zu BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Geographische Verbreitung

Haardtrand, Oberrheinisches Tiefland (Mittelgebirge), Trierer Bucht

Die räumliche Verbreitung der Lias-Ablagerungen in Rheinland-Pfalz beschränken sich auf den Haardtrand, die Trierer Bucht und Teile des Oberrheinischen Tieflandes.

Stratigraphie:

Jura, Unterjura (Lias)

Der Lias wird unterteilt in die Stufen des Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium, Toarcium. Alle Stufen sind in Rheinland-Pfalz lediglich am Haardtrand erhalten geblieben. Biostratigraphisch wird der Lias in Lias α , β , γ , δ , ϵ und ζ untergliedern (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2005). Als potentielle Tongesteine sind in Rheinland-Pfalz die Abfolgen des Lias α und Lias δ aufgeführt.

Fazies/Ablagerungsraum

Die kontinental bzw. randmarin geprägte Sedimentation der Trias wurde durch die Transgression während des Unteren Juras (Lias) beendet und es dominierten stabile Sedimentationsbedingungen eines Schelfmeeres (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2005). Im Bereich des Rheinischen Schiefergebirges bildete die Rheinisch-Ardennische Insel die einzige Hochlage, die gröber-klastische proximale Lias-Ablagerungen im Bereich der Trierer Bucht verursachte (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2005).

Lithologie

Lias α : dunkelblaugraue Tonmergel, bioturbat, Pyrit und Feinglimmer führend (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2005)

Lias δ : dunkelblaugraue Ton- und Mergelsteine, einzelne Kalkknollen (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2005)

- Haardtrand:
 - Lias α : dunkelblaugraue Tonmergel, bioturbat., Pyrit- und Feinglimmerführend (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2005)
 - Lias δ : dunkelblaugraue Ton- und Mergelsteine, einzelne Kalkknollen (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2005)
- Oberrheinisches Tiefland:
 - Posidonienschiefer-Fm. (Untertoarcium): schwarzgraue bis bräunlich schwarze feingeschichtete Ton- und Tonmergelsteine sowie Mergel- bis Kalkmergelsteine
 - Obtususton-Fm. (Obersinemurium): dunkel- bis schwarzgraue Tonsteine und Tonmergelsteine
 - Langenbrücken-Fm. (Sinemurium, Hettangium): grauen, z. T. bituminösen Ton- und Tonmergelsteinen mit einzelnen Kalk- und Siltsteinbänken
 - Jurensismergel-Fm. (Obertoarcium): graue Mergel- und Kalksteine

Mächtigkeit

- Trierer Bucht:
 - Gesamtmächtigkeit: 20 m – 25 m
- Oberrheinisches Tiefland
 - Mönning et al. (2015b): Posidonienschiefer-Fm. (Untertoarcium): Durchschnittliche Mächtigkeit 10 m – 15 m; maximale Mächtigkeit: 40 m (Langenbrückener Senke)
 - Mönning et al. (2015c): Obtususton-Fm. (Obersinemurium): Gesamtmächtigkeit bis zu 35 m

- Bloos et al. (2014): Langenbrücken-Fm. (Sinemurium, Hettangium): Durchschnittliche Mächtigkeit 30 m – 40 m; maximale Mächtigkeit: 65 m (Langenbrückener Senke)
- Nitsch et al. (2015): Jurensismergel-Fm. (Obertoarcium): durchschnittlich wenige Meter mächtig; maximale Mächtigkeit: 19 m – 20 m (Haardtrand)

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes – und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden. Diese sind in Tabelle 140 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG -Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 140: Auflistung aller verwendeten Daten.

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BGR	11844870_01/ 6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
2	RP	LBG		*.mdb	Datei Datenlieferung vom 11.06.2020	Bohrungsdaten LBG

Eigenrecherche

Allgemeine Literatur

Landesamt für Geologie und Bergbau, Rheinland-Pfalz (LGB-RLP) (2005): Jura, Geologie von Rheinland-Pfalz. 400 S. Stuttgart (Schweizerbart).

Mönning et al. (2015b): Posidonienschiefer-Formation - Record Nr. 4012098. [Litholex Online Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 19.10.2015. Zugriff am: 16.07.2020.

https://litholex.bgr.de/pages/MainApp.aspx?_sys_params=Nr8PDn_4fNCQfZiUX8sxJCnDDD2DVQI3Sf3DXReGhR8sCsX_c-wQ52DwSNHOEqbWd53NAj3phMM

Mönning et al. (2015c): Obtususton-Formation - Record Nr. 4012099. [Litholex Online Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 19.10.2015. Zugriff am: 16.07.2020.

https://litholex.bgr.de/pages/MainApp.aspx?_sys_params=Nr8PDn_4fNCQfZiUX8sxJCnDDD2DVQI3Sf3DXReGhR8sCsX_c-wQ52DwSNHOEqbWd53NAj3phMM

Bloos et al. (2014): Langenbrücken-Formation - Record Nr. 4012050. [Litholex Online Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 02.01.2015. Zugriff am: 16.07.2020.

https://litholex.bgr.de/pages/MainApp.aspx?_sys_params=Nr8PDn_4fNCQfZiUX8sxJc_nDDD2DVQI3Sf3DXReGhR8sCsX_c-wQ52DwSNHOEqbWd53NAj3phMM

Nitsch et al. (2015): Jurensismergel-Formation - Record Nr. 4012084. [Litholex Online Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 09.10.2015. Zugriff am: 16.07.2020.

https://litholex.bgr.de/pages/MainApp.aspx?_sys_params=Nr8PDn_4fNCQfZiUX8sxJc_nDDD2DVQI3Sf3DXReGhR8sCsX_c-wQ52DwSNHOEqbWd53NAj3phMM

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

In Rheinland-Pfalz besteht nach Auswertung der Literaturangaben kein weiterer Bedarf einer karten- oder modellbasierten Analyse der Unterjuraformationen im Hinblick auf die Erfüllung der Mindestanforderungen. Diese beiden Schritte entfallen daher.

3D-Bearbeitung

Für die Bereiche des Haardtrands in Rheinland-Pfalz wurde kein 3D-Modell ausgewertet.

2D-Bearbeitung

Basierend auf den oben angegebenen Daten zu Lithologie sowie Mächtigkeit der Ablagerungen des Unterjura, erfüllt keine der verbreiteten Formationen diese Mindestanforderungen. Aus diesem Grund entfällt die Berücksichtigung des Unterjura im Bundesland Rheinland-Pfalz für das weitere Standortauswahlverfahren.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen.

Tondominierte Abfolgen der kontinuierlichen Reihe Kalkstein – Mergel – Tonstein können als potentielle Wirtsgesteine betrachtet werden. Insbesondere Formationen, die aus Mergel-Tonsteinen bestehen, erfüllen mit hoher Wahrscheinlichkeit die Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit (Hoth et al. 2007). Abfolgen von Tonmergelsteinen, Mergelsteinen hingegen erfüllen die geforderten Gebirgsdurchlässigkeiten nur teilweise (Hoth et al. 2007).

Bei genauerer Betrachtung sind die Abfolgen des Lias in Rheinland-Pfalz geprägt durch stark erhöhte Karbonatgehalte (LGB-RLP 2005). Diese lassen nicht erwarten, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ erfüllt ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Maximale Mächtigkeiten aller Tongesteinsformationen des Unterjura in Rheinland-Pfalz betragen 40 m (siehe Mönning et al. 2015a, Mönning et al. 2015b, Bloos et al. 2014, Nitsch et al. 2015). Auch die durch das LGB übersandten Bohrungsdaten und dazugehörige Schichtenverzeichnisse zeigen deutlich, dass in keinem Fall eine relevante Tongesteinsabfolge des Unterjura die erforderlichen 100 m überschreiten.

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher als nicht **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Basierend auf den durch die zuständige Behörde übersandten Bohrungsdaten und Schichtenverzeichnissen wurde kein Bohrungsbeleg gefunden, der eine über 100 m mächtige relevante Abfolgen von Tongestein des Unterjura im Tiefenbereich zwischen 300 m und 1500 m belegt. Die Mindestanforderung „Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ ist somit in Rheinland-Pfalz nicht erfüllt.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen die Anforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG für die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit sowie nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG für die Mindestanforderung an die Mächtigkeit und die Tiefenlage nicht erfüllen, kommen die Einheiten des Unteren Jura in Rheinland-Pfalz nicht als Gebiete für einen Endlagerstandort in Betracht. Aufgrund dessen wurden keine Gebiete ausgewiesen und keine weiteren Mindestanforderungen geprüft.

Ergebnis

Im Bundesland Rheinland-Pfalz befinden sich keine Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen. Es findet daher im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens keine Berücksichtigung.

Entscheidungserhebliche Daten

Im Folgenden sind Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

Als entscheidungserheblich wurde für die Anwendung der Mindestanforderungen für den Lias in Rheinland-Pfalz lediglich die bereits erwähnte Literatur eingestuft.

1.3.13 Unterjura – Sachsen-Anhalt

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Unterjura (Lias), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Sachsen-Anhalt.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Sachsen-Anhalt, welche die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Unterjura (Lias)

Der Unterjura, der mit der informellen Bezeichnung Lias in Norddeutschland vertreten ist (Mönnig et al. 2018), kann in folgende Stufen untergliedert werden: Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium. Zudem sind die Substufen bzw. Formationen wie Carixium als Unter-Pliensbachium und Domerium als Ober-Pliensbachium bekannt (Landesamt für Bergbau Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) 2014). Alle Stufen sind in Sachsen-Anhalt unter Überdeckung von jüngeren Ablagerungen verbreitet. Die Erfüllung der Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) wird in Sachsen-Anhalt für die Stufe des Hettangium und die Arietenton-Formation des Sinemurium als zweifelhaft betrachtet. Alle anderen Stufen in Unterjura werden jedoch weiter betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Lias und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Sachsen-Anhalt entnommen werden (vgl. Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Die Tongesteinsformationen des Lias sind nahezu überall in der Region Altmark verbreitet. Zudem erstreckt sich die Verbreitung südöstlich von der Altmark bis in die südlichen

Ausläufer des Flämings (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e; Hoth et al. 2007; Beutler & Mönning 2008).

Der Lias ist nicht flächendeckend in Sachsen-Anhalt vorhanden. Nördlich der Mitteldeutschen Hauptabbrüche in der Altmark ist der Jura, wobei der größte Anteil auf den Lias entfällt, flächenhaft unter jüngerer Bedeckung verbreitet. Im Süden des Landes fehlt der Jura sowie auch der Lias vollständig (Beutler & Mönning 2008).

Fazies/Ablagerungsraum

Am Übergang der Trias zum Jura erfolgen aus westlicher Richtung marine Transgressionen in das Norddeutsche Becken, welche ihre größte ostwärts gerichtete Ausdehnung im Pliensbachium erreichen (Barth et al. 2018). Insgesamt ist der Lias gekennzeichnet durch eine Abfolge mariner Transgressionen und Regressionen. Der Westteil des Norddeutschen Beckens stellt im Lias größtenteils einen marinen Faziesraum dar, welcher durch die Ablagerung vorwiegend toniger Sedimente gekennzeichnet ist (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e). Im Ostteil dominierten vornehmlich limnisch-brackische Bedingungen. Dieser Ablagerungsraum wurde durch den Eintrag sandiger, terrigener Sedimente des Fennoskandischen Schilds (Petzka et al. 2004) und des Böhmisches Massivs beeinflusst (Paul et al. 2008). Generell ist das Norddeutsche Becken im Lias geprägt durch eine vorwiegend tonige Beckenfazies im Westen sowie durch die Ablagerung sandiger Sedimente im Ostteil des Beckens und in Küstennähe, als Teil der Beckenrandfazies (Hoth et al. 2007; Lott et al. 2010; Barth et al. 2018).

Die Eichsfeld-Altmark-Schwelle war nur zeitweise wirksam und machte sich vor allem durch eine andere Fazies bemerkbar. Die Sandschüttungen vom Fennoskandischen Festland erreichten nur im Hettangium das nördliche Sachsen-Anhalt. Es überwiegen vor allem dunkle, tonige Beckensedimente (Beutler & Mönning 2008).

Lithologie

Die Angulaten-Schichten sind helle Feinsandsteine mit dunklen Ton- und Siltsteinen und stellen die Stufe des Hettangiums dar. Sie nehmen somit den basalen Teil des Lias ein. Sie können bis zu 100 m mächtig sein (Bachmann et al. 2008).

Das Sinemurium kann in zwei verschiedene tonige Einheiten gegliedert werden:

Arietenton: geringmächtige dunkle Tonsteine mit Karbonatbänken, z. T. eisenoolithische Sandsteine (5 m bis 20 m mächtig) (Bachmann et al. 2008).

Raricostatenton: Eintönige dunkelgraue Tonstein, von einzelnen Karbonatbänken untergliedert (40 m bis 50 m mächtig) (Bachmann et al. 2008).

Das Pliensbachium kann in zwei verschiedene tonige Einheiten gegliedert werden:

Capricornuton: Dunkle Tonsteine mit einzelnen Lagen von Kalk- und Dolomitsteinen (ungefähr 25 m mächtig) (Bachmann et al. 2008).

Amaltheenton: Schwarzgraue Tonsteine, vereinzelt helle Feinsandsteine; (LithoLEX: kalkarme, schwarzgraue Tonsteine, oft feinsandig in helleren Flasern, nach Nordosten zunehmend, östlich der Altmark in die sandige und brackische Komorowo-Formation übergehend. Charakteristisch sind Lagen von Toneisensteingeoden, oder durchgehende siderische Bänke. Im Emsland auch bituminöse Fazies) (Mächtigkeit 100 m bis 110 m) (Mönnig et al. 2015a).

Das Toarcium kann in zwei verschiedene tonige Einheiten gegliedert werden:

Posidonienschiefer: Bitumenreiche, dunkelgraue bis schwarze Tongesteine, laminiert, reich an organischer Substanz (C_{org} 5-10 %) (Mächtigkeit bis max. 30 m in der südlichen Altmark, mind. 60 m in der nördlichen Altmark) (Bachmann et al. 2008).

Dörntenschiefer und Jurensis-Mergel: Dunkel- bis bräunlichgraue Tonsteine mit einzelnen hellen Feinsandsteinlagen (Mächtigkeit bis 50 m) (Bachmann et al. 2008).

Mächtigkeit

Der Lias von Sachsen-Anhalt ist in der südlichen Altmark ungefähr 200 m mächtig und in der nördlichen Altmark ungefähr 400 m mächtig. Davon entfällt der größte Anteil auf die Stufe des Pliensbachium (Beutler & Mönnig 2008; Mönnig et al. 2018).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden. Diese sind in Tabelle 141 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG -Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 141: Auflistung verwendeter Eingangsdaten.

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BGE	11902999/ 9870	ts/pl	ST_SKUA_Export	SPBA-3D für Sachsen-Anhalt
3	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mess_h_tol10	Digitales Geländemodell
4	DE	BGR	11844870_01/ 6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
5	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Norddeutschland_Ost	Bohrdatenbank Tonstudie

Eigenrecherche

Thematische Karten

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

Beutler, G. & Mönning, E. (2008): Unterer Jura. In: Gerhard H., Bachmann, G., Ehling B.-C., Eichner, R., Schwab, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt, Abb. 4.10-2, S. 234, Verbreitung und Mächtigkeit des Lias.

Folgende Karten wurden zur groben Überprüfung und zum Abgleich verwendet:

Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Berlin und Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abb. 4.12, S. 68, Unterjura: Anwendung der AkEnd-Kriterien „Mächtigkeit und Tiefenlage“.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): Lias: Hettang + Untersinemur. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): Lias: Obersinemur + Carix. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): Lias: Domer. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): Lias: Toarc. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

South Permian Basin Atlas (SPBA) (Lott et al. 2010):

1. Oberes Sinemarium bis Unteres Plienbachium (Shape: jusio_juplu.shp)
2. Toarcium (Shape: jutc.shp)
3. Oberes Sinemurium bis Unteres Aalenium (Shape: jusio_jmalu.shp)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Lias in Sachsen-Anhalt geprüft wurde, ist in Tabelle 142 aufgeführt. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse im Folgenden aufgeführt.

Tabelle 142: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Lias aus der Basisfläche Lias	b_Lias_ST.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Lias_ST_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Lias_ST_MACRORESULT_qs.ts
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII sowie der ergänzten Bearbeitungsfläche im shp-Format	MG_t_ju_ST.dxf MG_t_ju_ST.txt MG_t_ju_STPolygon_klein_Grenze.shp

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS	GIS-Projekt: Lias
a) Import der Flächen aus 2h als DXF und shp in ArcGIS	
b) Auflösen der Bearbeitungsfläche	MG_t_ju_ST_dissolved.shp
c) Zusammenführen der Bearbeitungsfläche und der ergänzten Bearbeitungsfläche	MG_t_ju_ST_dissolved_merged
d) Vektorisierung des Verbreitungsgebietes des Lias in Abb. 4.12 aus Beutler & Mönning 2008 in ArcGIS	Geol_von_ST_Lias_Verbreitung
e) Zusammenführen der Flächen aus b) und c) und Erzeugung einer shape-Datei	Modellflaeche_Geol_von_ST_merged
f) Erweiterung der Fläche mit Hilfe der lithologisch-paläogeographischen Karten aus Hoth et al. (2007) und (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e)	
g) Separieren der Fläche in Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Trennen“	Modellflaeche_Geol_von_ST_merged_cut_10sq km
h) Entfernen aller Flächen mit einer Fläche kleiner als 10 km ² und Benennung der Gebiete	Modellflaeche_Geol_von_ST_merged_cut_10sq km
i) Bohrungsdaten einladen	Lias_Tonstudie_Hoth_et_al_2007
j) Auf Sachsen-Anhalt begrenzen	Bohrungen_ST
k) Prüfung auf MA (300 m bis 1500 m)	Bohrungen_ST_innerhalb_MA
l) Prüfung auf MA (Mächtigkeit größer als oder gleich 100 m)	Bohrungen_ST_innerhalb_MA_geringmaechtig Bohrungen_ST_innerhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m
m) Differenzierung nach Tongehalt	Bohrungen_ST_innerhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m_Tong_1 Bohrungen_ST_innerhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m_Tong_2 Bohrungen_ST_innerhalb_MA_gleich_o_maechtiger_100m_Tong_3

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 142 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete 3D-Modell wurde im Rahmen der Standortauswahl auf Basis des 2D-Kartenwerkes des SPBA erstellt (Doornenbal & Stevenson 2010). Auf Basis von Isolinen wurden Hilfsflächen modelliert, deren Verschneidungen und Durchdringungen entfernt wurden. Aus diesen Hilfsflächen wurden elf Basisflächen modelliert.

- Tertiär (ST_131_t_iso_rev01)
- Oberkreide (ST_140_kro_iso_rev01)
- Unterkreide (ST_150_kru_iso_rev01)
- Oberjura (ST_160_jo_iso_rev01)
- Mitteljura (ST_170_jm_iso_rev01)
- Unterjura (ST_180_ju_iso_rev01)
- Keuper (ST_190_k_iso_rev01)
- Oberer Buntsandstein (ST_201_so_iso_rev01)
- Unterer Buntsandstein (ST_210_su_iso_rev01)
- Zechstein (ST_220_z_iso_rev01)
- Rotliegendesedimente (ST_240_ro_iso_rev01)

Störungen sind im Datensatz des SPBA als Linien ohne Teufenangaben ausgewiesen. Im SPBA-3D wurden diese Störungslinien auf die modellierten Flächen projiziert, aber versetzen die Horizonte nicht.

Das digitale Geländemodell für Sachsen-Anhalt wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 142, Nr. 2a – e).

Für die Bearbeitungsfläche Lias wurde aus dem SPBA-3D-Modell die Basisfläche Unterjura (ST_180_ju_iso_rev01) verwendet.

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Lias und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Malm, der Unter- sowie Oberkreide und des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m

angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 142, 2f).

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ m u GOK überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, wurden gelöscht (Tabelle 142, 2g).

Die Bearbeitungsfläche Lias wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 142, 2h).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Zur Ausweisung von identifizierten Gebieten im Tongestein im Lias in Sachsen-Anhalt wurden ausgewählte Verbreitungskarten georeferenziert und vektorisiert. Die verwendeten Karten sind in Kapitel 2.2 aufgelistet.

Die Basisfläche der Verbreitung des Lias aus dem SPBA (Tabelle 142, 3d) wurde mit Hilfe der in Kapitel 2.2 genannten thematischen Karten erweitert (Werkzeug „Feature erstellen“ sowie „Feature ändern“). Die dadurch erhaltene Fläche liegt als ein Polygon vor. Diese Fläche wurde mit Hilfe des Werkzeugs „Trennen“ in ArcGIS in einzelne Flächen separiert, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ geprüft werden kann. Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt.

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bildet das Kapitel „Jura“ der „Geologie von Sachsen - Anhalt“ zur Verbreitung des Lias in Sachsen - Anhalt (Beutler & Mönning 2008). Unterstützend findet die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), deren Zwischenbericht von 2003 (Feldrappe 2003) sowie die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2013) Anwendung. Diese Studien wurden zur weiteren Beurteilung der mit dem verwendeten Kartenmaterial erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Lias geprüft.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen (Tabelle 141 und

Tabelle 144. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Hettangium bis Toarcium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Landesgrenzen von Sachsen-Anhalt geprüft. Die Tonschichten in den Bohrungen, die die vorgenannten Mindestanforderungen erfüllen, werden in drei verschiedene Tongehaltsgruppen unterteilt: Kumulierte Schichten mit einem Tonanteil größer als 80 % werden als „Tongehalt 1“ eingestuft, mit einem Tonanteil zwischen 60 % und 80 % als „Tongehalt 2“ und mit einem Tongehalt unter 60 % als „Tongehalt 3“.

24 Bohrungen erfüllen dabei die Mindestanforderungen „Mächtigkeit des ewG“ und „minimale Teufe des ewG“:

- 23 davon befinden sich in der auf Grundlage des Kartenmaterials ausgewiesenen Fläche.
- 5 davon sind der „Tongehaltskategorie 1“ (größer als 80 % Tonanteil) zuzuordnen.
- 13 davon sind der „Tongehaltskategorie 2“ (60 % bis 80 % Tonanteil) zuzuordnen.
- 20 davon befinden sich in der Region Altmark und die restlichen vier Bohrungen südöstlich, in der Region Fläming.
- der überwiegende Anteil (ungefähr 92 %) von den Bohrungen ist der Stratigraphie des Pliensbachium zuzuordnen.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. In Jahn et al. (2016) sind Durchlässigkeitswerte (k_r -Wert) für den Opalinuston aufgelistet, die durch Packertests in Bohrungen an zwei schweizerischen Lokalitäten (Mont Terri und Bohrung Benken) ermittelt wurden, und alle Werte liegen im Bereich oder unterhalb von 10^{-12} m/s.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die

Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse, zeigen Bereiche in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit, teilweise oder nicht erfüllt ist.

Wie aus der Inventarisierungstabelle (siehe Kapitel 5) zu entnehmen, sind die Tongesteinsformationen des Lias überwiegend homogen aufgebaut. In den Gesteinsformationen dominiert Tonstein mit Einschaltungen von z. B. vereinzelt Kalkbänken oder Feinsandsteinlagen. Mit Hilfe der lithologisch-paläogeographischen Karten der DDR (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e), Fazieskarten aus Beutler & Mönnig (2008), Hoth et al. (2007) sowie SPBA (Doornenbal & Stevenson 2010) konnten tonige Faziesbereiche in der gesamten Altmark im Norden von Sachsen-Anhalt sowie tonige Faziesbereiche, die sich bis in den Süden des Fläming erstrecken, identifiziert werden. Im Gebiet der Calvörde-Scholle fehlt die Lias-Verbreitung allerdings vollständig.

Weiterhin bestätigen Bohrungsdaten der Tonstudie das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit einem Tonanteil von mindestens 60 % (Hoth et al. 2007).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Unteren Jura in den verbleibenden Gebieten in Sachsen-Anhalt **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Lias wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Lias zusammen. Als geeignete Tongesteine wurden alle Stufen des Unterjura ausgewiesen. In den betrachteten Gebieten (im Nodern der Altmark) werden für die angegebenen Stufen Mächtigkeiten von zum Teil deutlich mehr als 100 m beschrieben. Zum jetzigen Zeitpunkt kann jedoch keine weitere Eingrenzung vorgenommen werden.

Des Weiteren wurden Bohrdaten der Tonstudie sowie thematische Karten zum Lias (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e; Hoth et al. 2007) hinsichtlich der Mächtigkeiten größer 100 m geprüft. Da die thematischen Karten (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e) sowie insgesamt 23 Bohrungen in den ausgewiesenen Flächen in Sachsen-Anhalt im Lias (kumulative) Mächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Lias wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK (und oberhalb von 1500 m u. GOK) erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt.

Des Weiteren wurden Bohrdaten der Tonstudie hinsichtlich der Tiefenlage der Tongesteinsformationen im Lias überprüft.

23 Bohrungen mit Mächtigkeiten von größer 100 m in den ausgewiesenen Flächen in Sachsen-Anhalt im Lias zeigen Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m. Alle diese Bohrungen sind in den ausgewiesenen Flächen verstreut lokalisiert. Daher wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als zunächst **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Flächenbedarf“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Sachsen-Anhalt können Gebiete ausgewiesen werden, in denen die Formationen des Lias alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese werden im Ergebnismodell vorgestellt (Abbildung 61).

Ergebnis

In Abbildung 61 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Lias in Sachsen-Anhalt dargestellt. Abbildung 62 zeigt einen repräsentativen geologischen Profilschnitt durch Sachsen-Anhalt vom Harz im Süden über die Magdeburger Börde und die Colbitz-Letzlinger Heide bis zur Altmark im Norden.

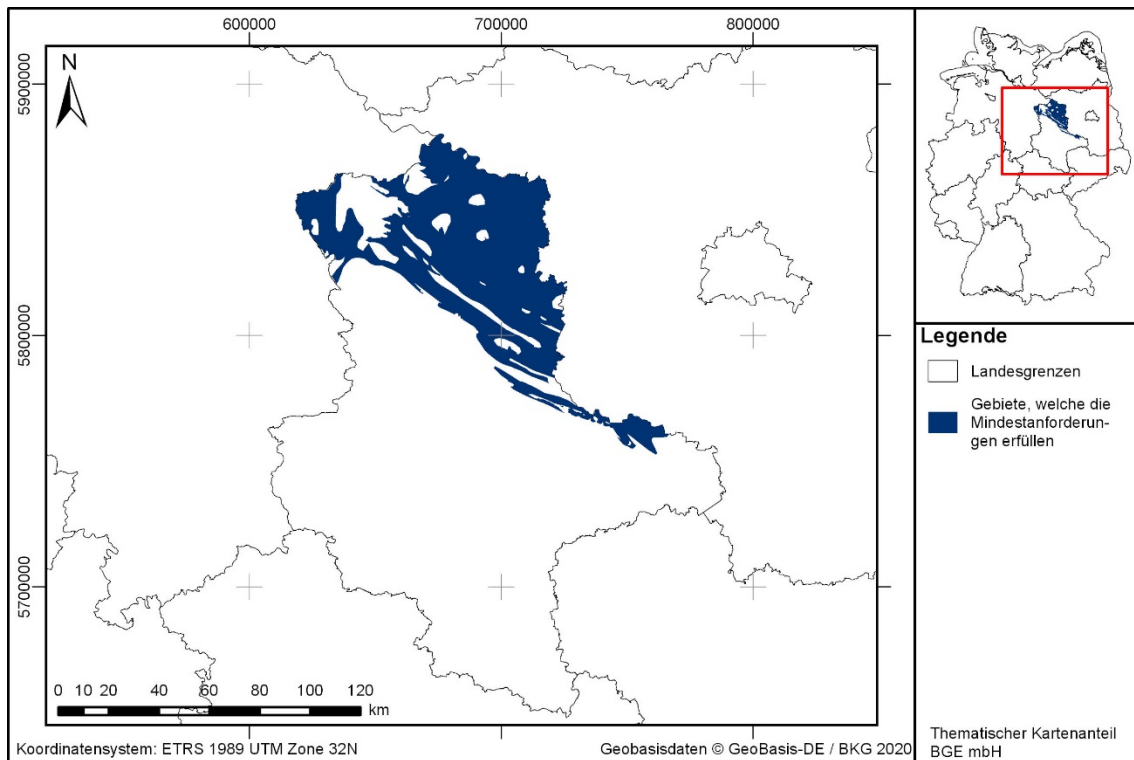


Abbildung 61: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Lias in Sachsen-Anhalt

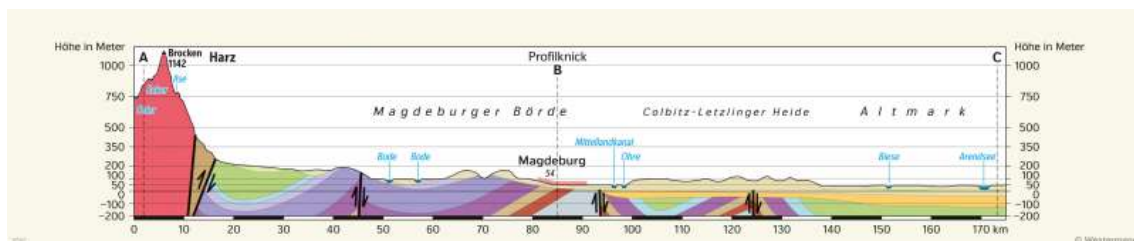


Abbildung 62: Geologischer Profilschnitt durch Sachsen-Anhalt (Colditz et al. 2019) vom Harz im Süden über die Magdeburger Börde und Colbitz-Letzlinger Heide bis zur Altmark im Norden. Während in der Magdeburger Börde die jungpaläozoischen Einheiten aufgeschlossen sind, stehen sie in Richtung Altmark erst in größeren Tiefen an.

Tabelle 143: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Flächengrößen

ID-Mindestanforderungsgebiet	Fläche [km ²]
MG_t_ju_ST_1	352
MG_t_ju_ST_2	4400

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 144 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 144: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppen- ID	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11902999	9870		ST_SKUA_Export		SPBA-3D für Sachsen-Anhalt
11884574	8906	2385810	Norddeutschland_Ost	Schichtenverzeichnisse Kleinau 101/61, Aulosen 7/59, Dähre 1 /81, Waddekath 40 /69, Groß Schwechten 101 /64, Zollchow 1 /71	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)

Entscheidungserhebliche thematische Karten aus Eigenrecherche

Beutler, G. & Mönnig, E. (2008): Jura. In: Gerhard H., Bachmann, G., Ehling B.-C., Eichner, R., Schwab, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt, S. 231 ff.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitungsgrenze des Lias der Karte „Verbreitung und Mächtigkeit des Lias“ (Abb. 4.10-2 auf Seite 234).

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): Lias: Hettang + Untersinemur. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): Lias: Obersinemur + Carix. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): Lias: Domer. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): Lias: Toarc. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

1.3.14 Unterjura – Schleswig-Holstein

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Unterjura (Lias), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Schleswig-Holstein.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von identifizierten Gebieten, die aus der Anwendung der Ausschlusskriterien und der Prüfung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) resultiert. Danach erfolgt eine geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Lias

Der unterste Teil des Jura (Lias) ist in folgende Stufen untergliedert: Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium. Das Hettangium stellt die stratigraphisch älteste Einheit des Lias dar. Alle Stufen sind in Schleswig-Holstein verbreitet und werden mit Blick auf die Aufgaben des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und die damit an das Gestein bestehenden Eigenschaften für die Prüfung der Mindestanforderungen im Sinne der Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) erneut in Betracht gezogen.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Lias und deren lithologische Ausprägung sind der tabellarischen Übersicht Schleswig-Holsteins zu entnehmen (vgl. Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

In Schleswig-Holstein werden aus lithostratigraphischer Sicht zwei Verbreitungsgebiete unterschieden: 1) Westholsteiner Trog und 2) Ostholsteiner Trog. Beide Randsenken bildeten sich in Folge der Absenkung des Norddeutschen Beckens bis in den Mittleren Jura (Dogger) aus (Heunisch et al. 2017a). Die Verbreitung des Lias ist in Schleswig-Holstein auf Grund der mit Erosion verbundenen jungkimmerischen Hebung im Oberen Jura auf den Zentralbereich und den Südosten des Bundeslandes begrenzt und weist

teilweise lediglich geringe Mächtigkeiten auf (Hese 2012). Abtragung oberhalb aufsteigender Salzdiapire bewirkt, dass Ablagerungen des Unteren Jura in halokinetisch aktiven Gebieten lediglich geringmächtig in Randsenken auftreten (Hese 2012; Thomsen et al. 2017).

Fazies-/Ablagerungsraum

Der Übergang des Oberen Keuper (Steinmergelkeuper/Rhät) zum Unteren Jura (Lias) ist vor allem durch einen Wechsel des Sedimentationsraumes von kontinental (limnisch-terrestrisch) zu marin durch einsetzende Transgression im Westen des epikontinentalen Zentraleuropäischen Beckens geprägt (Hese 2012; Thomsen et al. 2017). Dieses Vordringen des Meeres erfolgt diachron – von Nordwesten nach Süden und Südosten, was sich ebenfalls in den abgelagerten Fazies widerspiegelt. Prinzipiell sind auf Grund der Ausbildung der beiden Randsenken (Westholsteiner Trog und Ostholsteiner Trog) zwei große Faziesgebiete zu unterscheiden: 1) Westfazies und 2) Ostfazies, die sich in lithologisch-petrographischer Hinsicht im Sandanteil der tonig dominierten Fazies differenzieren lassen (Westfazies: keine Sandeinlagerungen, Ostfazies: bis zu 10 m mächtige Sandsteinlagen (Angulatensandstein) (Hese 2012).

Lithologie

Die einzelnen Stufen der Unterkreide lassen sich lithologisch wie folgt kurz beschreiben:

- Hettangium:
 - o Pre-planorbis-Schichten, Tonstein, Hettangium-Tonstein
- Sinemurium:
 - o Sinemurium-Tonstein mit Toneisensteingeoden und -lagen
- Pliensbachium:
 - o Amaltheenton: kalkarme, schwarzgraue Tonsteine, Mergelsteine, oft feinsandige Einlagerungen
- Toarcium:
 - o Posidonienschiefer: schwarzgraue bis bräunlich schwarze feingeschichtete Ton- und Tonmergelsteine sowie Mergel- bis Kalkmergelsteine

Mächtigkeit

Nachfolgende Mächtigkeiten sind für die einzelnen Stufen der Unterkreide im Untersuchungsgebiet heranzuziehen.

- Hettangium: unbekannte Mächtigkeit
- Sinemurium: Mittlere Mächtigkeit 50 m – 100 m; maximal 180 m (Bohrung We-sendorf im Gifhorner Trog)
- Pliensbachium: Gesamtmächtigkeit bis zu 200 m
- Toarcium: Gesamtmächtigkeit bis größer als 180 m, mittlere Mächtigkeit stark variabel: 20 m – 100 m

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 145). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 145: Auflistung verwendeter Eingangsdaten.

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ GruppenID; Geschäftszeichen BGE	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/7728	*.shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/8853	*.ASCII	DGM10_dyn_mesh_t0110	Digitales-Gelände-Modell
3	SH	LLUR	11839735/6220	*.pl/*ts	3D_Basismodell_SH	3D Basismodell SH (Hese et al. 2012)
4	DE	BGR	11844870_01/6846	*.pdf	BGR_Tonstudie2007	Studie der BGR (Hoth et al. 2007)

Eigenrecherche

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

Barth, G. (2019): Stratigraphie, Fazies und geothermisches Potenzial von fluvio-deltatischen Ablagerungsräumen der Oberen Trias und des Unteren Jura im östlichen Teil des Mitteleuropäischen Beckens, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, S. 225, Freiberg

1. Biofacies reconstructions for the Early Hettangian–Early Sinemurian. Continental highs are after Ziegler (1990). Biofacies reconstructions for: (a) the maximum flooding of the initial transgression in the Early Hettangian Planorbis Chronozone; (b) the maximum flooding of the transgression in the Middle Hettangian Liasicus Chronozone; (c) the maximum regression of the regression in the Late Hettangian Angulata Chronozone; and (d) the maximum flooding of the initial second-order transgression in the Early Sinemurian Semicostatum Chronozone. (SG02102/7-1/28-2020#59; 822335 (F.4_Angulata); 822336 (F.4_Liasicus); 822337 (F.4_Planorbis); 822338 (F.4_Semicostatum))
2. Biofacies reconstructions for the Early Sinemurian–Early Pliensbachian. Continental highs are after Ziegler (1990). Biofacies reconstructions for: (a) the maximum regression of the second-order regression in the late Early Sinemurian

Turneri Chronozone; (b) the maximum flooding of the transgression in the Late Sinemurian Obtusum–Oxynotum Chronozone; (c) the maximum regression of the regression in the Late Sinemurian Raricostatum Chronozone; and (d) the maximum flooding of the second-order transgression in the Early Pliensbachian Jamesoni–Ibex Chronozone. (SG02102/7-1/28-2020#59; 822339 (F.5_Jamesoni); 822340 (F.5_Obtusum); 822341 (F.5_Raricostatum); 822342 (F.5_Turneri))

3. Biofacies reconstructions for the early Late Pliensbachian–Early Toarcian. Continental highs are after Ziegler (1990). Biofacies reconstructions for: (a) the maximum regression of the second-order regression in the early Late Pliensbachian Margaritatus Chronozone (Stokesi Subchronozone); (b) the maximum flooding of the transgression in the Late Pliensbachian Spinatum Chronozone (Apyrenum Subchronozone); (c) the maximum regression of the regression in the latest Pliensbachian Spinatum Chronozone (latest Hawskerense Subchronozone); and (d) the maximum flooding of the first-order transgression in the Early Toarcian Tenuicostatum–Serpentinum Chronozone. (SG02102/7-1/28-2020#59; 822343 (F.6_LowerToarcian); 822344 (F.6_Margaritatus); 822345 (F.6_SpinatumI); 822334 (F.6_SpinatumII))

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): *Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc.* 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): *Lias: Hettang + Untersinemur.* 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): *Lias: Obersinemur + Carix.* 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): *Lias: Domer.* 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): *Lias: Toarc.* 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Unterkreide in Schleswig-Holstein geprüft wurde, ist in Tabelle 146 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 146: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche (ArcGIS)
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Unterkreide aus der Basisfläche Unterkreide	b_Unterjura_SH.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit < 100 m löschen	b_Unterjura_SH_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Unterjura_SH_MACRORESULT_qs.ts
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_ju_SH.dxf MG_t_ju_SH.txt
3. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche (ArcGIS)
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	
4. Integration von 2D geologischen Informationen (digitalisiertes Kartenmaterial, Bohrungsdaten)	Tongestein_Lias_NDB.aprx
a) Die Biofazieskarten von Barth (2019) wurden georeferenziert und die Verbreitung toniger Fazies mit den ausgewiesenen Gebieten verglichen.	F.4_Angulata.png F.4_Liasicus.png F.4_Planorbis.png F.4_Semicostatum.png F.5_Jamesoni.png F.5_Obtusum.png F.5_Raricostatum.png F.5_Turneri.png F.6_LowerToarcian.png F.6_Margaritatus.png F.6_SpinatumI.png F.6_SpinatumII.png
b) Die paläogeographischen Karten des Zentralen Geologischen Instituts (Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e) wurden digitalisiert und georeferenziert und die Verbreitung sowie die Tiefenlage des Lias mit den ausgewiesenen Gebieten verglichen.	Hettang_Toarc_ZGI_1975.tif Hettang_Untersinemur_ZGI_1975.tif Obersinemur_Carix_ZGI_1975.tif Domer_ZGI_1975.tif Toarc_ZGI_1975.tif Tiefenlage_Lias_BGR_2001.tif Mächtigkeit_Lias_BGR_2001.tif
c) Alle Bohrungen aus den Bohrdatenbanken des LLUR plotten und ggf. Schichtenverzeichnisse auf Vorhandensein toniger Unterjurafazies sowie deren Mächtigkeit und Tiefenlage prüfen.	
5. Qualitätssicherung	
a) Abgleich mit Bohrungsdaten, die außerhalb der ausgewiesenen Flächen liegen	Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche (ArcGIS)
6. Finale Ausweisung des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	SH_Lias_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 146 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das Basismodell SH ist ein erstes geologisches 3D-Modell des Geologischen Dienstes SH (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume LLUR) aus dem Jahr 2012 (Hese et al. 2012). Zur Bearbeitung des Modells wurden Daten des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland (Baldschuhn et al. 2001) verwendet. Störungsflächen wurden nicht als durchgehende Flächen ausgehalten, sondern lediglich als vertikale Versätze dargestellt. Das modellierte Gebiet umfasst das komplette Bundesland Schleswig-Holstein inklusive der 12-Seemeilen-Zone. Folgende Flächen wurden hauptsächlich als Basisflächen modelliert:

- GTA3D_00_Topographie: Geländeoberfläche
- GTA3D_01_Basis_TmiR: Mittleres Miozän
- GTA3D_02_Basis_TmiU: Miozän
- GTA3D_03_Basis_TolM: Mittleres Oligozän
- GTA3D_04_Basis_TeoM: Mittleres Eozän
- GTA3D_05_Basis_TpaO: Oberes Paläozän
- GTA3D_06_Basis_KrO: Obere Kreide
- GTA3D_07_Basis_KrU: Untere Kreide
- GTA3D_08_Basis_JO: Oberer Jura
- GTA3D_09_Basis_JM: Mittlerer Jura
- GTA3D_10_Basis_JU: Unterer Jura
- GTA3D_11_Basis_K: Keuper
- GTA3D_12_Basis_SO: Oberer Buntsandstein
- GTA3D_13_Basis_SU: Unterer Buntsandstein
- GTA3D_14_Basis_Z: Zechstein
- GTA3D_Salzdiapire: Hüllflächen der Salzstrukturen

Da im Bereich der Ost- und Nordsee auch Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, erwartet werden, wurde das Basismodell SH verwendet und nicht das ebenfalls vorhandene StörTief-Modell.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 146 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Bearbeitungsfläche Unterjura wurde aus der Basisfläche Unterjura des Basismodells SH erstellt (Tabelle 146, 2b).

Das Digitale Geländemodell für Schleswig-Holstein wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 146, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 146, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 146, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Unterjura und der Topfläche berechnet (Tabelle 146, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Mittleren und Oberen Jura der Unter- sowie Oberkreide und des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 146, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 146, 2g). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Unterjura wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 146, 2h).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Alle in Tabelle 146, Nr. 3b) beschriebenen Karten wurden vor der Auswertung digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert. Die Verbreitung sowie die Tiefenlage des Lias wurde mit den ausgewiesenen Gebieten verglichen (Tabelle 146, 4b).

Abgleich mit Bohrungsdaten

Das geologische Landesamt von Schleswig-Holstein hat Bohrungsdaten in Form einer Datenbank geliefert. Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden zur Qualitätssicherung geprüft (Tabelle 146, 4c).

Zusätzlich wurden die in der Tonstudie von (Hoth et al. 2007) veröffentlichten Bohrungsdaten auf den Tonanteil, die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb des Landesgrenzen von Schleswig-Holstein geprüft (Tabelle 146, 4c).

Ein Abgleich der Bohrungen mit den Ergebnissen der Mächtigkeits- und Fazieskarten erfolgte in folgenden Schritten:

- Einladen der Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) sowie der Bohrungsdatenbank des geologischen Landesamtes
- Im Falle der Landesbohrdatenbank: Abgleich der mit den Bohrungsdaten übermittelten Schichtenverzeichnisse mit den erzeugten Flächen.
- Im Falle der Tonstudie: Abgleich des Tongehalts und der kumulativen Mächtigkeiten der Bohrungsdaten mit den erzeugten Flächen.

Bewertung der Tongesteine aller Stufen:

Da das 3D-Modell des Landes Schleswig-Holstein den kompletten Unterjura beinhaltet, können die einzelnen stratigraphischen Stufen nicht einzeln analysiert werden.

Die Biofazieskarten von Barth (2019) zeigen, dass das gesamte Bundesland Schleswig-Holstein über den gesamten Lias hinweg in einem tiefmarinen Ablagerungsraum liegt, was die Bildung toniger Fazies zur Folge hat (Tabelle 146, 4a). Dies bestätigt die Verbreitung toniger Fazies im Betrachtungsraum und somit die durch das 3D-Modell erstellten Flächen.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen

werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithoty-
pen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen
jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräu-
mige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu
einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Die Boh-
rungslokationen der Tonstudie (Hoth et al. 2007) zeigen keinerlei Übereinstimmung mit
den ausgewiesenen Gebieten. Durch Hoth et al. (2007) werden lediglich 10 Bohrungen
der „Tonanteilkategorie 1a“ (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) im Süden Schleswig-
Holsteins ausgewiesen. Da diese entweder das Mächtigkeitskriterium nicht erfüllen oder
nicht die erforderliche Tiefenlage aufweisen, findet keine Erweiterung der auf Basis des
Landesmodells erstellten Flächen statt.

Eine Verbreitung der tonigen Fazies wird jedoch auf Grund der Publikation von Barth
(2019) in den ausgewiesenen Flächen nachgewiesen.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird die Mindestanforderung
Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein des Lias in Schleswig-Holstein als **erfüllt** betrach-
tet.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Unterjuras wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mäch-
tigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigra-
phischen Einheit des Unterjuras zusammen.

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird
als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Unterjura wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des
Digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfül-
len die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt.

Mithilfe der Karte des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Tessin et al. 1975a) wur-
den die Teufenangaben der aus dem Ländermodell extrahierten Flächen zusätzlich
überprüft und konnten teilweise verifiziert werden. Außerdem wurde eine maximale
Teufe von 1500 m u. GOK angesetzt, die erfüllt wurde.

Die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m unter GOK“ wird da-
her zunächst als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen
(BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der

2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird nach der Ausweisung der Identifizierten Gebiete erneut geprüft.

Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Im Rahmen der Bearbeitung wurden alle Gebiete ausgeschlossen, welche ein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die zusätzlich alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 63 ist das Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Einheit Unterjura in Schleswig-Holstein und in Abbildung 64 sowie Abbildung 65 sind geologische Profile durch Schleswig-Holstein dargestellt, welche die über dem Unterjura liegenden Einheiten zeigen.

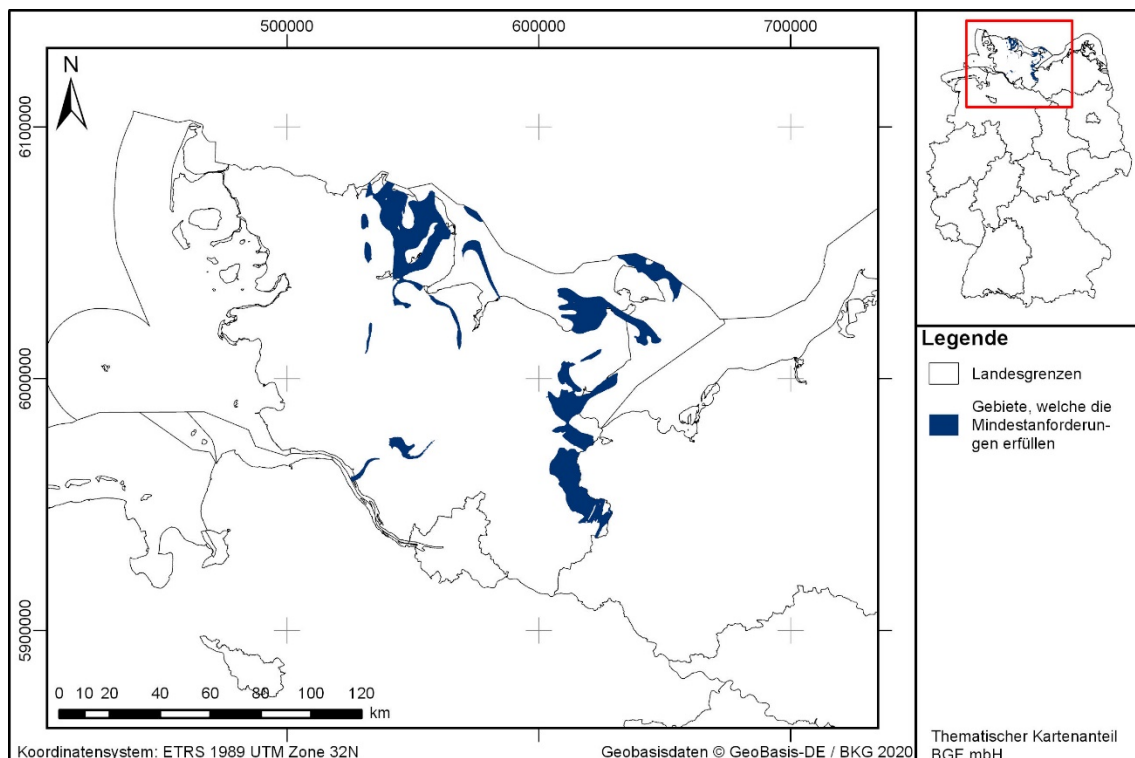


Abbildung 63: *Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen*

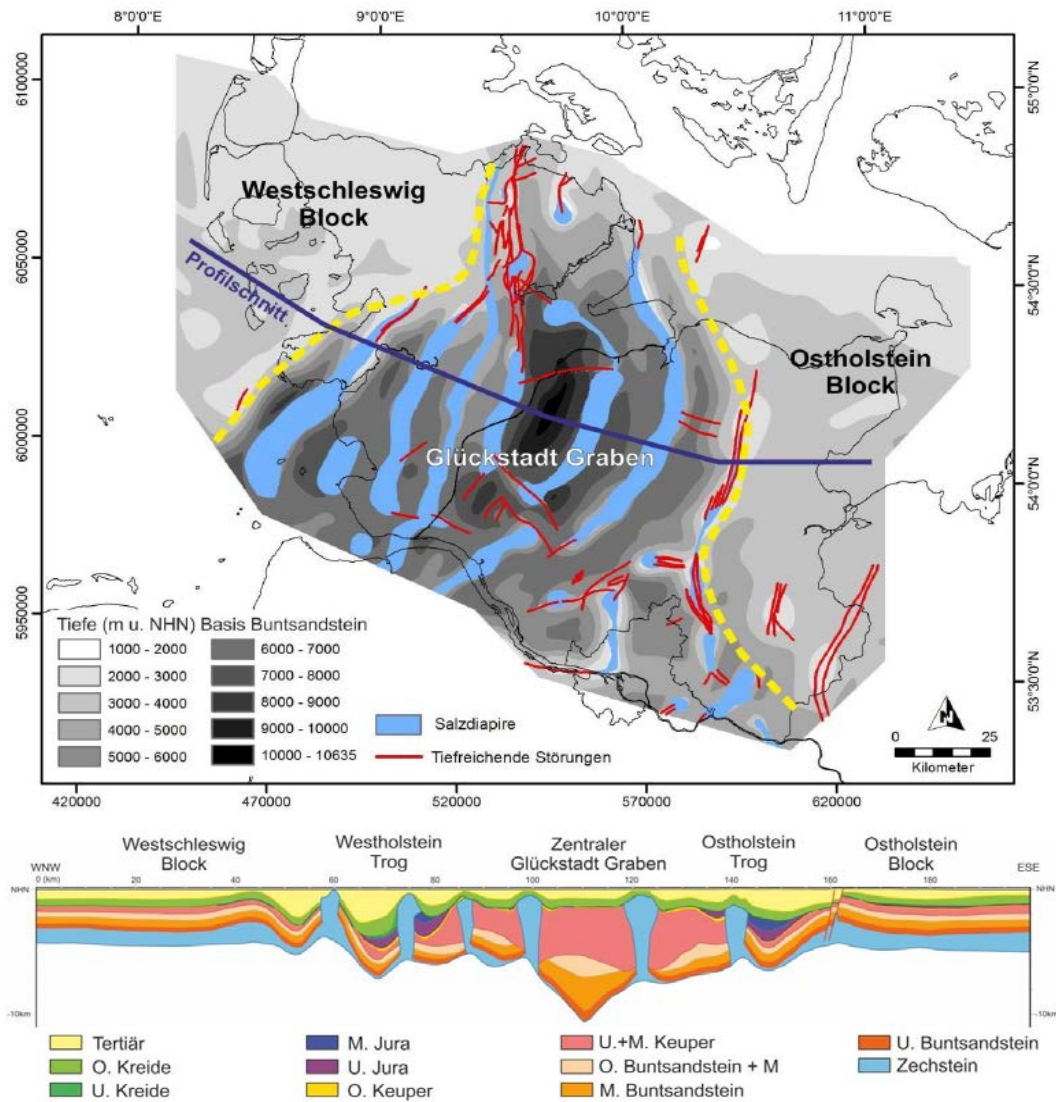


Abbildung 64: Geologischer Profilschnitt durch Schleswig-Holstein (Thomsen et al. 2017; basierend auf Baldschuhn et al. 2001)

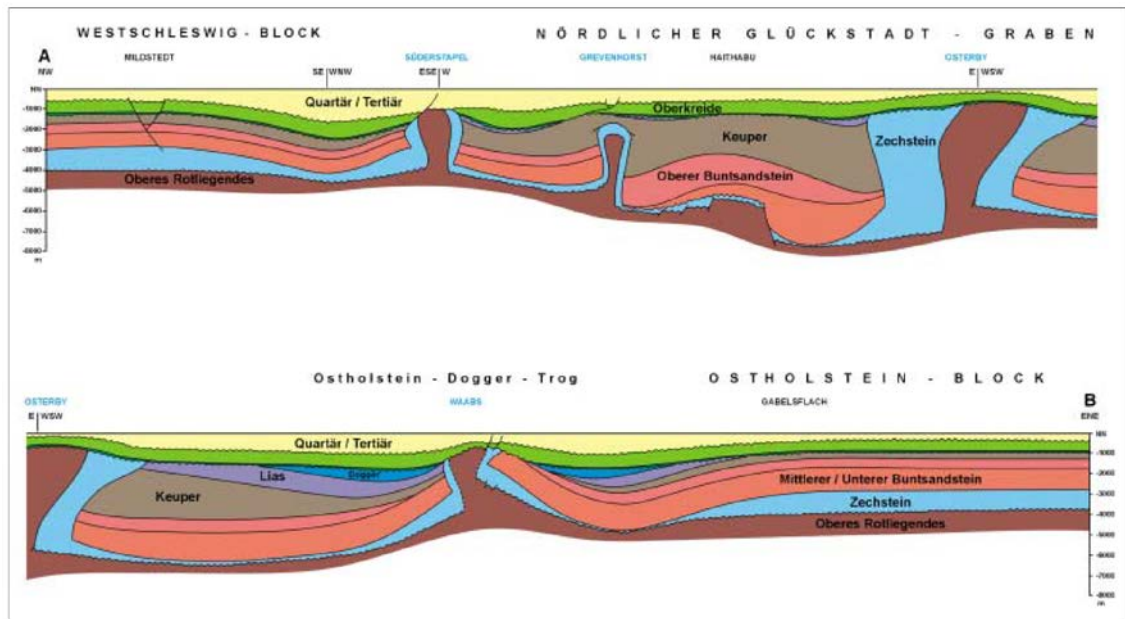


Abbildung 65: West-Ost-Schnitt durch Schleswig-Holstein vom Westschleswig-Block über den (nördlichen) Glückstadt-Graben zum Ostholstein-Block (Baldschuhn et al. 2001)

Eine Auflistung dieser auch als „Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen“ bezeichneten Ergebnisflächen ist in Tabelle 147 zu finden.

Tabelle 147: Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, die die Mindestanforderungen erfüllen mit Angabe der Fläche

ID	Fläche [km ²]
MG_t_ju_SH_1	321,6
MG_t_ju_SH_2	618,6
MG_t_ju_SH_3	135,6
MG_t_ju_SH_4	319,5
MG_t_ju_SH_5	310,6
MG_t_ju_SH_6	37,1
MG_t_ju_SH_7	52,4
MG_t_ju_SH_8	13,8
MG_t_ju_SH_9	57,8
MG_t_ju_SH_10	20,7
MG_t_ju_SH_11	15,0
MG_t_ju_SH_12	18,6
MG_t_ju_SH_13	12,3
MG_t_ju_SH_14	18,0

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 148 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 148: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank.

DokID	Gruppen-ID	Datei-ID	Name des Datensatzes	Vermerk
11839735	6220		3D_Basismodell_SH	Basismodell SH 3D-Modell (Hese et al. 2012)

Entscheidungserhebliche Daten aus Eigenrecherche

Barth, G. (2019): Stratigraphie, Fazies und geothermisches Potenzial von fluviodeltatischen Ablagerungsräumen der Oberen Trias und des Unteren Jura im östlichen Teil des Mitteleuropäischen Beckens, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, S. 225, Freiberg

1.3.15 Mittlerer Jura – Brandenburg, Berlin

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Dogger, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet Brandenburg und Berlin.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Dogger erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Brandenburg und Berlin, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie: Jura, Mittlerer Jura (Dogger)

Der Mittlere Jura, der mit der informellen Bezeichnung Dogger in Norddeutschland vertreten ist (Mönnig et al. 2018), kann in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Alle Stufen sind in Brandenburg und Berlin unter Bedeckung verbreitet. Aufgrund der Inventarisierung der stratigraphischen Einheit Mittlerer Jura (vgl. Kapitel 5) werden im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) in Brandenburg und Berlin Tongesteine der Stufen Aalenium, Bajocium und Callovium betrachtet. Da diese Stufen den überwiegenden Teil des Mittleren Jura bilden, werden in diesem Schritt des Verfahrens die Stufen des Dogger als eine Einheit untersucht.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Dogger und deren lithologische Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Brandenburg und Berlin entnommen werden (siehe Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Norden und Westen Brandenburgs sowie lokale Vorkommen im östlichen bis südöstlichen Brandenburg; südwestliches bis südöstliches Berlin (Schudack & Tessin 2015)

Der Dogger ist nicht flächendeckend in Brandenburg und Berlin vorhanden. Nahezu flächendeckend verbreitet ist der Dogger im Norden und Westen Brandenburgs sowie im südwestlichen bis südöstlichen Berlin. Im Norden und Westen Brandenburgs fehlt der Dogger lediglich im Bereich von Salzstrukturen und deren Umrandung.

Des Weiteren gibt es lokale Vorkommen im östlichen bis südöstlichen Brandenburg.

Fazies/Ablagerungsraum

Im Dogger veränderte sich die paläogeographische Situation, als sich Gondwana von Laurasia endgültig abtrennte und sich der Zentralatlantik und der Penninische Ozean öffneten. Das Nordmeer drang nach Mitteleuropa vor, im Süden bestand eine Verbindung zur Neotethys. Des Weiteren waren das Norddeutsche und das Süddeutsche Becken im Dogger über die Hessische Senke miteinander verbunden (Mönnig et al. 2018).

Das Mitteleuropäische Becken gliederte sich auf, sodass sich zunehmend Senkungsstrukturen in Nordwest-Südost-Richtung bildeten (Beutler & Mönnig 2008; Meschede 2018). Mitteleuropa war von einem flachen Epikontinentalmeer überflutet, das zur Ablagerung von mächtigen Tonabfolgen führte. Marine Einflüsse kamen neben den westlichen Richtungen auch aus dem Nordosten (z. B. Zentrum der Dänisch-Polnischen Senke; (Petzka et al. 2004). Es kam zu einem Wechsel von marinen und brackischen Bedingungen, wobei der marine Anteil im Verlauf des Mittleren Jura deutlich zunahm (Petzka et al. 2004). Im Callovium tritt die größte Meeresausbreitung in Brandenburg auf (Schudack & Tessin 2015).

Ab dem Ober-Aalenium und Bajocium erfolgten häufige lithofazielle Wechsel von fluviatildeltaischen Sandsteinen und mächtigen marinen Ton- und Siltsteinen mit Einschaltungen von Toneisensteinlagen, Sideritoiden und kalkigen Sedimenten (Schudack & Tessin 2015). Die Schüttungsrichtung änderte sich von Ost zu Nord (z. B. Ringkobing-Fyn-Hoch, Nordwestmecklenburg-Schwelle) (Petzka et al. 2004). Im Bathonium kam es verstärkt zu Sandschüttungen von Fein- bis Mittelsandsteinen sowie Kalk- bis Kalksandsteinen ("Cornbrash"; Schudack & Tessin 2015). Ab dem Callovium dominierten wiederum tonige Ablagerungen (Ornatenton-Formation).

Lithologie

Aalenium: Im westlichen Brandenburg zunächst marine Sedimentation der Opalinuston-Formation, die den basalen Teil des Aalenium einnimmt und eine Folge von blau- bis schwarzgrauen, schluffigen Tonsteinen oder Tonmergelsteinen darstellt, oben und unten mit feinsandigen Kalkbänken (Franz et al. 2013). Im östlichen und nördlichen Brandenburg eher sandige Folge, die meist aus Fein- und Mittelsandsteinen besteht, z. T. etwas feinkiesige Ausprägung (Schudack & Tessin 2015) (Teile der Wusterhusen-Formation sowie des Altmark- Sandsteins der Ludwigienton-Formation (nach Mönnig 2008)).

Bajocium (Schudack & Tessin 2015): In der westlichen Prignitz tonige Sedimentabfolgen mit bis zu wenige Meter mächtigen Sandsteineinlagerungen, bestehend aus Parkinsonientonformation, Garantiantonformation, und Sonninentonformation. Nach Osten

und Süden stark abnehmende Mächtigkeiten, im Südwesten ist Bajocium nur lückenhaft vorhanden. Im Norden fehlen Unter- und Mittelbajocium.

Bathonium (Schudack & Tessin 2015): Im Nordwesten im tieferen Bereich Tonsteine, ansonsten sowohl im Unter- als auch Oberbathonium hellgraue bis bräunlichgraue Fein- bis Mittelsandsteine sowie graue, eisenschüssige Kalk- bis Kalksandsteine abgelagert. In Nordbrandenburg, teilweise auch in Westbrandenburg, Sideritooideinlagerungen im Ober- und Unterbathonium. In Nordost-Brandenburg besteht das Oberbathonium hauptsächlich aus Tonsteinen mit eingelagerten Sand- und Karbonatsteinhorizonten mit Sideritlagen. Mittel- Bathonium fehlt in Brandenburg und Berlin. In Ost- und Südostbrandenburg fehlt auch Unter-Bathonium. Dort tritt an der Basis von Tonsteinen teilweise ein geringmächtiges Konglomerat auf. Die Stufe Bathonium wird aufgrund seiner lithologischen Ausprägung nicht als geeigneter Tongesteinshorizont betrachtet.

Callovium (Schudack & Tessin 2015): Das Callovium in Brandenburg und Berlin wird von der Ornatenton-Formation dominiert. Diese ist aufgebaut aus dunklen, fossilführenden, kalkhaltigen marinen Tonsteinen, wechselnd stark schluffig mit Toneisensteinlagen und -knollen.

Mächtigkeit (Schudack & Tessin 2015)

Die Abfolgen des Aaleniums weisen Mächtigkeiten von 50 m – 100 m mit Maximalwerten von 295 m in Randsenken auf. Die Mächtigkeit der tonigen Abfolgen des Bajociums betragen 20 m – 140 m, mit abnehmender Mächtigkeit nach Osten (20 m – 60 m). Die tonigen Ablagerungen des Calloviums sind 40 – 80 m mächtig, maximal wird eine Mächtigkeit von 142 m erreicht.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden. Diese sind in Tabelle 149 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG -Code 25832 (UTM 32N/ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 149: Auflistung aller verwendeten Daten.

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG25)	Verwaltungsgrenzen

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
2	DE	BGR	11844870_01/6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
3	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales-Gelände-Modell
4	BB	LBGR	11878605/ 7872	ts	Brandenburg 3D	3D-Modell (Schilling et al. 2018)
5	DE	BGR	11897915/9559	pdf	Tongesteine als Barriere_jm_NE-D	Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2003)
6	DE	BGR	11884574/8906	mdb	Norddeutschland_Ost	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
7	BB	LBGR	11874780/8997	mdb	Endlager_BGE_300_frei_dSV_Doku	Schichtenverzeichnisse Bohrdatenbank Brandenburg
8	BB	LBGR	11884623/8939	mdb	Endlager_BGE_300_vertr_dsv_pdf	Schichtenverzeichnisse Bohrdatenbank Brandenburg

Eigenrecherche

Zusätzlich wurde folgende thematische Karte verwendet:

Schudack & Tessin (2015): Jura. In: Stackebrandt, W. & Franke, D. (Hrsg.): Geologie von Brandenburg, S. 217 ff.

- Abb. 3.2.7-4: Heutige Verbreitung und Ausbildung von Ablagerungen des Dogger (Mitteljura) in Brandenburg, mit Profillinie

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Dogger in Brandenburg und Berlin geprüft wurde, ist in Tabelle 150 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren

Ergebnisse aufgeführt. Berlin ist in dem für Brandenburg verwendeten 3D-Modell enthalten, weshalb beide Bundesländer gemeinsam bearbeitet wurden.

Tabelle 150: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Dogger aus der Basisfläche L1 (Intra-Toarc)	b_Dogger_BB.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500 m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Dogger_BB_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Dogger_BB_MACRORESULT_qs.ts
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_jm_BB.dxf MG_t_jm_BB.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 06_Dogger_Nord
a) Umwandlung der DXF-Fläche aus 2h) in ein 2D-Shape und Trennen der Gesamtfläche in Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Trennen“	BB_Dogger_100m_maechtig.shp

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Digitalisierung und Vektorisierung der Grenzlinie der heutigen Maximalverbreitung des Dogger aus Schudack & Tessin (2015)	Verbreitung_Dogger_Stackebrandt.shp
c) Beschneidung des Polygons aus 2h) mit der Verbreitungsgrenze aus 3b)	BB_Dogger_100m_Stackebrandt.shp
d) Entfernung von Flächenteilen außerhalb der Landesgrenzen von Brandenburg und Berlin	BB_dogger_100m_Stackebrandt_Clip.shp
e) Separieren der Fläche aus 3d) in Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Trennen“	BB_dogger_100m_Stackebrandt_Clip.shp
f) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	BB_Dogger_MA_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 150 beschriebene 3D-Bearbeitung wurden das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell Brandenburg 3D (B3D) wurde vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) in Zusammenarbeit mit dem Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) entwickelt. Das Modellgebiet umfasst die Bundesländer Berlin und Brandenburg und enthält 12 reflexionsseismische Horizonte (Schilling et al. 2018):

- T1 (Transgressionsfläche Känozoikum)
- B2-T2 (Transgressionsfläche Mittelalb bis Cenoman)
- T3-T4 (Transgressionsfläche Unteralb bis Wealden)
- E1-E2 (Intra-Oxford bis Kimmeridge)
- L1 (Intra-Toarc)
- K2 (Top Oberer Gipskeuper)
- M1 (Intra-Hauptmuschelkalk)
- S1 (Top Salinarröt)
- X1 (Top Zechsteinsalinar)
- Z1 (Top Unterer Staßfurtanhydrit)

- Z3 (Basis Werraanhydrit)
- R6 (Basis Oberrotliegend II)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 150 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Als Bearbeitungsfläche Dogger wurde die Basisfläche L1 (Intra-Toarc) aus dem 3D-Modell verwendet (Tabelle 150, 2b). Demnach bezieht sich die Prüfung der Mindestanforderungen Mächtigkeit und Tiefenlage aus dem 3D-Modell auf die stratigraphische Einheit zwischen dem reflexionsseismischen Reflektor Intra-Toarc und dem Intra-Oxford und enthält somit Einheiten, die nicht dem Mittleren Jura zugeordnet werden. Die Prüfung der Mindestanforderungen der identifizierten Stufen Aalenium, Bajocium und Callovium wurde stichprobenartig an einzelnen Bohrungen durchgeführt.

Das Digitale Geländemodell für Brandenburg und Berlin wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 150, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 150, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 150, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Dogger und der Topfläche berechnet (Tabelle 150 f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen E1-E2, T3-T4, B2-T2 und T1 sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 150 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht.

Falls in dem Bearbeitungsgebiet 3D-gepufferte Störungen vorhanden sind, wurde für diese ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert (vgl. BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet,

dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 150, 2g).

Die Bearbeitungsfläche Dogger wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 150, 2h).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der gesamte Datensatz in einzelne Flächen getrennt, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft werden konnte (Tabelle 150, 3a). Anschließend wurde die Fläche aus dem 3D-Modell mit der digitalisierten und vektorisierten Verbreitungsgrenze aus Schudack & Tessin (2015) verschnitten, sodass alle Gebiete außerhalb der Verbreitungsgrenze entfernt wurden (Tabelle 150 3c). Außerdem wurden alle Gebiete außerhalb der Landesgrenzen von Brandenburg und Berlin entfernt. Zum Schluss erfolgte die Prüfung des Flächenbedarfs von 10 km². Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt, mit Ausnahme von Gebieten, die an der Grenze zu Sachsen-Anhalt oder Mecklenburg-Vorpommern liegen und dort fortgeführt werden (Tabelle 150, 3f). Da Berlin gemeinsam mit Brandenburg bearbeitet wurde, gehen die entsprechenden Gebiete dort über die Bundeslandgrenzen hinweg.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Feldrappe 2003; Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2013; Reinhold et al. 2011) und thematische Karten (Kölbel 1972a; Kölbel 1972b, 1972c) herangezogen und Bohrdaten, hauptsächlich Schichtenverzeichnisse aus den in Tabelle 149 aufgelisteten Bohrdatenbanken, auf die lithologischen Abfolgen des Mittleren Juras geprüft.

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bildet das Kapitel „Jura“ der „Geologie von Brandenburg“ (Schudack & Tessin 2015) zur Verbreitung des Dogger in Brandenburg. Unterstützend findet die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), deren Zwischenbericht von 2003 (Feldrappe 2003), die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2013) sowie das Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland (Reinhold et al. 2011) Anwendung. Neben den Studien wurden thematische Karten (Kölbel 1972a; Kölbel 1972b, 1972c) zur Beurteilung der mit dem 3D-Modell erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse (siehe Tabelle 149 und Tabelle 152) wurden auf die lithologischen Abfolgen des Dogger geprüft.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die

Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und „Tonanteils-Klasse“ zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt ist.

Außerdem wurden die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Aaleniums, Bajociums und Calloviums und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Landesgrenzen von Brandenburg und Berlin geprüft. Die exemplarisch genannten Bohrungen Karstädt Nord 5/58 und Karstädt/Perleberg 11/69 erfüllen dabei die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in der auf Grundlage des 3D-Modells ausgewiesenen Fläche. Diese zeigen für die Stufe Bajocium Tonformationen mit Tongehalten von mindestens 65 % in Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m und kumulative Mächtigkeiten von 166 m und 152 m. Des Weiteren zeigen die Bohrungen Karstädt Nord 5/58, Rhinow 5 h2/71 und Königsberg 102/61 Tonformationen mit Tongehalten zwischen 60 und 80 % in den Stufen Aalenium, Bajocium und Callovium in Tiefen zwischen 300 m und 1500 m, die jedoch kumulative Mächtigkeiten kleiner als 100 m aufweisen.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen. Lithotypen, deren Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die diese Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit Gebirgsdurchlässigkeiten kleiner gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Jedoch weisen Hoth et al. (2007) darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse, zeigen Bereiche in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit, teilweise oder nicht erfüllt ist.

Wie aus der Inventarisierungstabelle zu entnehmen (vgl. Kapitel 5), sind die Tongesteinsformationen des Dogger teilweise inhomogen aufgebaut. Neben Ton- und Tonmergelstein, die dominant vorliegen, enthalten die Formationen teilweise Einschaltungen von z. B. Mergel(ton)stein und unreinen Sand- und Schluffsteinen. Bohrungsdaten der Tonstudie (Karstädt Nord 5/58 und Karstädt/Perleberg 11/69) in der Stufe Bajocium mit Tongehalten von 65 % in einer Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m und kumulativen Mächtigkeiten von 166 m und 152 m bestätigen das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mindestens teilweise (Hoth et al. 2007). Des Weiteren zeigen die Bohrungen Karstädt Nord 5/58, Rhinow 5 h2/71 und Königsberg 102/61 Tonformationen mit Tongehalten zwischen 60 % und 80 % in den Stufen Aalenium, Bajocium und Callovium in Tiefen zwischen 300 m und 1500 m, die kumulative Mächtigkeiten zwischen 78 m und 99 m aufweisen.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Mittleren Jura für die verbleibenden Gebiete in Brandenburg und Berlin **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Dogger wurde im 3D-Raum berechnet. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Topfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Jura zwischen Intra-Toarc und Intra-Oxford zusammen. Als Stufen mit geeigneten Tongesteinen wurden jedoch lediglich die Stufen des Aalenium, Bajocium und Callovium ausgewiesen. Es ist daher anzunehmen, dass nur in Teilen des ausgewiesenen Gebiets eine Mächtigkeit des Tongesteins von 100 m erreicht wird. Dennoch werden für die angegebenen Stufen in den betrachteten Gebieten Mächtigkeiten von zum Teil deutlich mehr als 100 m beschrieben (siehe 2D-Bearbeitung). Zum jetzigen Zeitpunkt kann jedoch keine weitere Eingrenzung vorgenommen werden.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden Bohrdaten der Tonstudie sowie verschiedene thematische Karten hinsichtlich der Mächtigkeiten größer 100 m der Ablagerungen im Aalenium, Bajocium und Callovium (Kölbel 1972a; Kölbel 1972b, 1972c) geprüft. Da die thematischen Karten (Kölbel 1972a; Kölbel 1972b, 1972c) sowie mindestens zwei Bohrungen in den ausgewiesenen Flächen in Brandenburg und Berlin (kumulative) Mächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Dogger wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Des Weiteren wurden Bohrdaten hinsichtlich der Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m unter der Geländeoberkante geprüft. Da mindestens vier (exemplarisch genannte) Bohrungen in den ausgewiesenen Flächen in Brandenburg und Berlin im Aalenium, Bajocium und Callovium Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m zeigen, wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für das verbleibende Gebiet als zunächst **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Flächenbedarf“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg in angrenzenden Bundesländern fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der Identifizierten Gebiete geprüft.

Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Brandenburg und Berlin können Gebiete ausgewiesen werden, in denen die Formationen des Dogger alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 66).

Ergebnis

In Abbildung 66 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Dogger in Brandenburg und Berlin dargestellt.

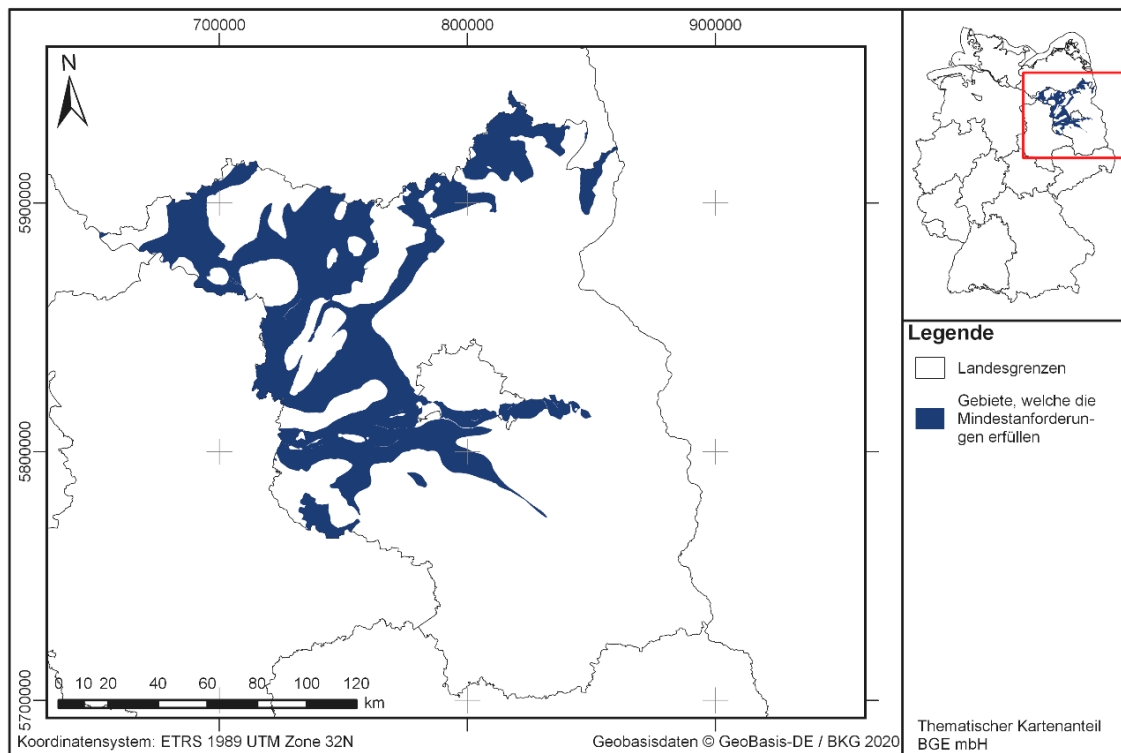


Abbildung 66: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Dogger in Brandenburg und Berlin. Die Landesgrenzen sind in schwarz abgebildet. Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, sind in blau dargestellt.

Eine Auflistung dieser die Mindestanforderungen erfüllende Gebiete ist in Tabelle 151 zu finden. Abbildung 67 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge der ausgewiesenen Gebiete.

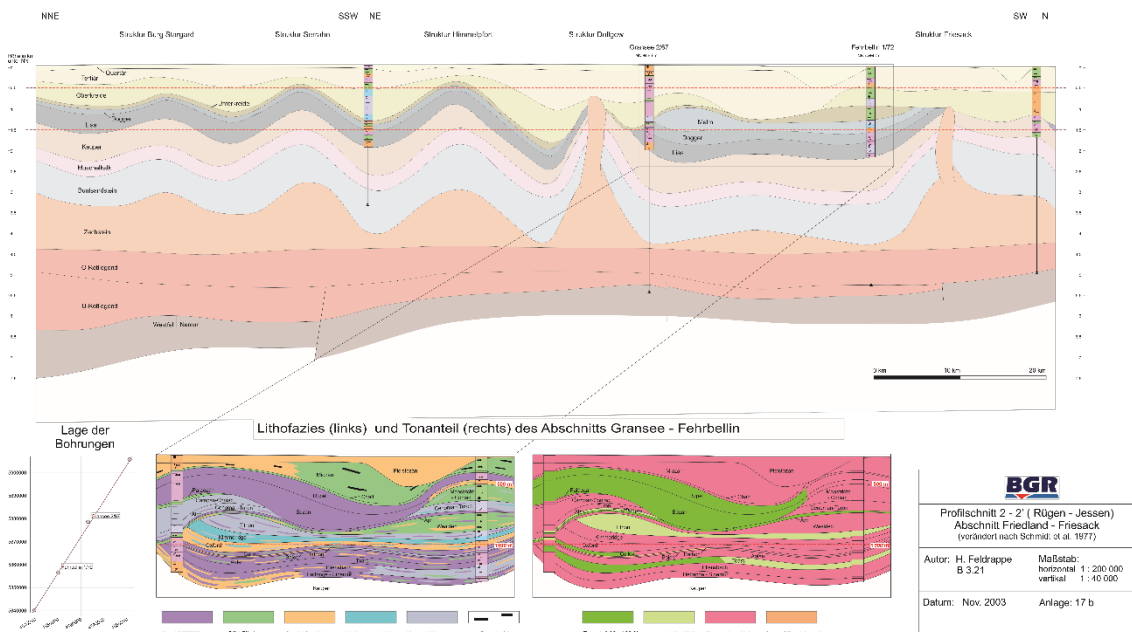


Abbildung 67: Profilschnitt von der Struktur Burg Stargard bis Struktur Friesack mit Lage der Bohrungen (Feldrappe 2003).

Der Nordost – Südwest verlaufende Abschnitt bildet das Deckgebirge in den ausgewiesenen Gebieten in Brandenburg ab. Tabelle 151: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km², befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der Identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Dogger_BB_1	6097
MG_t_Dogger_BB_2	678
MG_t_Dogger_BB_3	192
MG_t_Dogger_BB_4	175
MG_t_Dogger_BB_5	135
MG_t_Dogger_BB_6	126
MG_t_Dogger_BB_7	24
MG_t_Dogger_BB_8	11
MG_t_Dogger_BB_11	4
MG_t_Dogger_BB_18	3
MG_t_Dogger_BB_19	2
MG_t_Dogger_BB_23	1

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 152 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 152: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11878605	7872		Brandenburg 3D		3D-Modell
11884574	8906	2385810	Norddeutschland_Ost	Schichtenverzeichnisse Karstädt Nord 5/58, Karstädt/Perleberg 11/69, Rhinow 5 h2/71 und Königsberg 102/61	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)

Entscheidungserhebliche Daten aus Eigenrecherche:

(Schudack & Tessin 2015): Jura. In: Stackebrandt, W. & Franke, D. (Hrsg.): Geologie von Brandenburg, S. 217 ff.

- Verbreitungsgrenze des Dogger

1.3.16 Mittlerer Jura – Niedersachsen, Bremen, Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Dogger, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann (vgl. Kapitel 5.1). Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet Niedersachsen, Hamburg und Bremen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Dogger erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, Hamburg und Bremen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie: Jura, Mittlerer Jura (Dogger)

Der Mittlere Jura, der mit der informellen Bezeichnung Dogger in Norddeutschland vertreten ist (Mönnig et al. 2018), kann in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Alle Stufen sind in Niedersachsen, Hamburg und Bremen unter Bedeckung verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden in Niedersachsen, Hamburg und Bremen auf Basis der Inventarisierung der stratigraphischen Einheit Mittlerer Jura alle Stufen als potentiell geeignete Tongesteinshorizonte betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Dogger und deren lithologischer Ausprägung (vgl. Kapitel 5) kann der tabellarischen Übersicht Niedersachsen, Hamburg und Bremen entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Der Dogger ist nicht flächendeckend in Niedersachsen, Hamburg und Bremen vorhanden.

Flächendeckende Verbreitung gibt es im zentralen Niedersachsen im Niedersächsischen Becken sowie lokale Vorkommen im nördlichen und östlichen Niedersachsen, im

südöstlichen Bremen sowie im südlichen und östlichen Hamburg (Doornenbal & Stevenson 2010).

Fazies/Ablagerungsraum

Im Dogger veränderte sich die paläogeographische Situation, als sich Gondwana von Laurasia endgültig abtrennte und sich der Zentralatlantik und der Penninische Ozean öffneten. Das Nordmeer drang nach Mitteleuropa vor, im Süden bestand eine Verbindung zur Neotethys. Des Weiteren waren das Norddeutsche und das Süddeutsche Becken im Dogger über die Hessische Senke miteinander verbunden (Mönnig et al. 2018).

Das Mitteleuropäische Becken gliederte sich auf, sodass sich zunehmend Senkungsstrukturen in Nordwest-Südost-Richtung bildeten (Beutler & Mönnig 2008; Meschede 2018). Mitteleuropa war von einem flachen Epikontinentalmeer überflutet, das zur Ablagerung von mächtigen Tonabfolgen führte. Marine Einflüsse kamen neben den westlichen Richtungen auch aus dem Nordosten (z. B. Zentrum der Dänisch-Polnischen Senke, Petzka et al. 2004). Es kam zu einem Wechsel von marinen und brackischen Bedingungen, wobei der marine Anteil im Verlauf des Mittleren Jura deutlich zunahm (Petzka et al. 2004).

Ab dem Ober-Aalenium und Bajocium erfolgten häufige lithofazielle Wechsel von fluvialdeltatischen Sandsteinen und mächtigen marinen Ton- und Siltsteinen mit Einschaltungen von Toneisensteinlagen, Siderit-Ooiden und kalkigen Sedimenten (Schudack & Tessin 2015). Die Schüttungsrichtung änderte sich von Ost zu Nord (z. B. Ringkøbing-Fyn-Hoch, Nordwestmecklenburg-Schwelle, Petzka et al. 2004). Im Bathonium kam es verstärkt zu Sandschüttungen von Fein- bis Mittelsandsteinen sowie Kalk- bis Kalksandsteinen („Cornbrash“; Schudack & Tessin 2015). Ab dem Callovium dominierten wiederum tonige Ablagerungen (Ornatenton-Formation).

Lithologie

Aalenium (Franz et al. 2013; Mönnig 2014): Die Opalinuston-Formation bildet den basalen Teil des Aalenium und besteht aus einer Folge von blau- bis schwarzgrauen, schluffigen Tonsteinen oder Tonmergelsteinen, oben und unten mit feinsandigen Kalkbänken. Diese sind in Südniedersachsen als Tutenmergel ausgebildet. Das Ober-Aalenium besteht aus schwarzgrauen Tonsteinen mit Einschaltungen von Toneisensteingeoden oder dunkelgrauen, schwach glimmerigen Mergeln der Ludwigienton-Formation. Im Raum Bremen können an der Basis oolithische Eisenerze auftreten.

Bajocium (Mönnig 2014; Mönnig 2015a, 2015c, 2015d): Die Sonnintenton-Formation bildet das Unter-Bajocium und besteht aus dunkelgrauen bis schwarzgrauen, z. T. schwach sandigen Tonsteinen mit heller gefärbten Tonmergelsteinen. Die Coronatenton-Formation setzt sich aus unten dunkel- bis schwarzgrauen, weiter oben auch braungrauen, schwach sandigen Tonsteinen im Wechsel mit sandigen Mergeltonsteinen zusammen. Oftmals treten Lagen von Toneisenstein- und Karbonatkonkretionen auf. Die Garantiantenton-Formation wird gebildet aus dunkelgrauen oder dunkelbraungrauen Tonsteinen mit wenigen Kalk- oder Toneisensteingeoden. Im nördlichen Weser-Ems-

Gebiet sind die unteren 15 m bis 20 m deutlich feinsandig ausgebildet. An der niederländischen Grenze geht die Formation in einen 30 m mächtigen unreinen Sandstein über. Im oberen Teil ist die Formation zunehmend feinsandig. Die Parkinsonienton-Formation besteht aus Ton- und Tonmergelsteinen, die bankig ausgebildet sind. Innerhalb der Bänke nimmt der Anteil an Feinsand zu. Der Parkinsonienton ist dunkelgrau (10 YR 4/1), glimmerführend, schillreich, pyritisch, oft mit bioturbatem Gefüge. Im mittleren Teil der Formation kommen auch 20 m feinblättrige Tonsteine, im oberen Teil unreine Feinsandsteine vor. Typisch sind Lagen aus rotbraunen, faust- bis kopfgroßen Toneisensteingeoden.

Bathonium (Mönnig 2012a, 2012b): Das Unter-Bathonium besteht aus dünnen Lagen von grauen Tonsteinen mit Konkretionslagen, darunter befindet sich der Württembergica-Sandstein. Lokal, z. B. in der Hilsmulde können sandige, gelbgraue Tonsteine vorkommen. Das Mittel-Bathonium fehlt in Niedersachsen, Hamburg und Bremen. Das Ober-Bathonium wird von der Aspidoideston-Formation gebildet. Dieser besteht aus siltigem, mergeligem, schwarzgrauem, glimmerführendem, pyritischem Tonstein.

Callovium (Mönnig 2006): Die Ornatenton-Formation besteht aus dunklen Tonsteinen mit Schill- oder Belemnitlagen. An der Basis kommen verbreitet eisenoolithische Kalksteine als aufbereitete Konkretionslagen vor. Darüber liegen mächtige, gelblichgraue Silt- und Tonsteine, die nach oben und im proximalen Bereich sandiger werden und im Norden und Nordosten in den Werle-Sandstein übergehen. Über einer markanten Kalkbank folgen grünlich-graue Siltsteine, in die im oberen Teil Horizonte aus bis zu 1,5 m großen Konkretionen eingeschaltet sind.

Mächtigkeit (Franz et al. 2013; Mönnig 2006, 2012a, 2012b; Mönnig 2014; Mönnig 2015c, 2015b, 2015a, 2015d)

Aalenium: Die Abfolgen der Opalinuston-Formation weisen mittlere Mächtigkeiten von 20 m mit maximalen Mächtigkeit von 60 m auf. Die Tonsteine der Ludwigienton-Formation sind 40 m – 70 m, maximal 100 m, mächtig.

Bajocium: Die Sonnienton-Formation weist mittlere Mächtigkeiten von 50 m mit Maximalwerten von 98 m auf. Die Coronatenton-Formation ist im Mittel 20 m mächtig mit maximalen Mächtigkeiten von 80 m in der Bohrung Suderbruch. Die Garantianton-Formation ist 40 m mächtig. Im Raum Osnabrück kommen bis zu 80 m Ablagerungen vor. Die Ton- und Tonmergelsteine der Parkinsonienton-Formation weisen mittlere Mächtigkeiten von 60 m – bis 70 m auf, in der Bohrung Wiefelstede 1 im Emsland bis zu 190 m.

Bathonium: Die Ablagerungen des Unter-Bathonium werden 20 m mächtig, mit Maximalwerten von 67 m im Raum Osnabrück. Die Asperoideston-Formation wird 20 m mächtig, maximal werden 105 m im Emsland erreicht.

Callovium: Die tonigen Ablagerungen des Calloviums sind auf den Schwellen 10 m – 50 m mächtig, in den Trögen 80 m– 200 m, maximal werden mehr als 570 m Mächtigkeit in der Bohrung Werle E 4 erreicht.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 153). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 153: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	NI	LBEG	11842295/ 7775	ts	BGE-GTA3D	3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
2	HH	BUE	11880284/843 4	ASCII/ts	Tiefenmodell Hamburg	3D-Modell von Hamburg mit 2 Basis- und 1 Topfläche
3	DE	BKG	11865482/885 3	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Gelände-modell
4	DE	BKG	11875056/772 8	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Bundesländergrenzen inkl. 12-Seemeilen-Zone
5	DE	BGR	11844870_01/ 6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
6	DE	BGR	11897915_02/ 9574	pdf	Feldrappe_2006_Tongesteinsinformationen jm NWD_2020	PDF-Bericht Tonstudie (Feldrappe 2006)
7	DE	BGR	11884574/890 6	mdb	Norddeutschland_West	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
8	DE	LBEG	11881514/910 5	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 1. Teil	Landes-Bohrdatenbank Niedersachsen (LBEG)
9	DE	LBEG	11881514/910 5	accdb	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 2. Teil	Landes-Bohrdatenbank Niedersachsen (LBEG)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
10	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturum- risse_500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
11	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturum- risse_1000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
12	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturum- risse_1500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
13	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturum- risse_2000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Dogger in Niedersachsen, Hamburg und Bremen geprüft wurde, ist in Tabelle 154 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt. Hamburg und Bremen sind in dem für Niedersachsen verwendeten 3D-Modell enthalten, weshalb die drei Bundesländer gemeinsam bearbeitet wurden.

Tabelle 154: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Dogger aus der Basisfläche Dogger 11_jutco-jmcl0 (aus allen Kacheln)	b_Dogger_NI.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Dogger_NI_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Dogger_NI_MACRORESULT_qs.ts
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_jm_NI.dxf MG_t_jm_NI.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 06_Dogger_Nord
a) Umwandlung der DXF-Fläche aus 2h) in ein 2D-Shape und Zusammenfassen der Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Dissolve“	NI_MA_Gebiet_2D_Dissolve.shp
b) Beschneidung des Polygons mit der Landesgrenze Niedersachsens, Hamburgs und Bremens	NI_MA_Gebiet_2D_Dissolve_Clip.shp
c) Entfernung von Flächen kleiner 10 km ² (Ausnahme Bundeslandgrenzen)	NI_MA_Gebiet_2D_Dissolve_Clip_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 154 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D; Bombien et al. 2012) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell ist die digitale Umsetzung des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = Digitales Geländemodell

- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tp1 = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg sowie weite Teile von Niedersachsen, mit Ausnahme des südlichen Bereichs ab Höhe Göttingen, ab. Die Flächen des GTA3D sind in 42 Kacheln untergliedert.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 154 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen kachelweise vor, daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Dogger-Basisflächen (11_jutco-jmclo) erzeugt (Tabelle 154, 2b). Allerdings treten an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermaschung) auf.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 154, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_1500m angehoben (Tabelle 154, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 154, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Dogger und der Topfläche berechnet (Tabelle 154, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Malm, der Unter- sowie Oberkreide, des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM__{-300m}) zusammen (Tabelle 154, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM__{-1500m} angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 154, 2g). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D - Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit den Lokalitäten und den Umrissen von Salz in steiler Lagerung nach Baldschuhn et al. (2001), Gast & Riesenberg (2016) und Pollok et al. (2016) verglichen. Schließlich wurden ausgewiesene Flächen innerhalb der Lokalitäten von Salzstrukturen bzw. Salz in steiler Lagerung herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Dogger wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 154, 2h).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurden die nicht zusammenhängenden Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen. Anschließend wurden alle Gebiete außerhalb der Landesgrenzen von Niedersachsen, Hamburg und Bremen entfernt (Tabelle 154, 3b). Zum Schluss erfolgte die Prüfung des Flächenbedarfs. Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt, mit Ausnahme von Gebieten, die an der Grenze zu Sachsen-Anhalt, Brandenburg oder Nordrhein-Westfalen liegen und dort fortgeführt werden (Tabelle 154, 3c).

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Feldrappe 2006; Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011; Reinhold et al. 2013) sowie Verbreitungskarten (Doornenbal & Stevenson 2010; Feldrappe 2006) herangezogen und Bohrdaten, hauptsächlich Schichtenverzeichnisse aus den in Tabelle 153 aufgelisteten Bohrdatenbanken, auf die lithologischen Abfolgen des Mittleren Jura geprüft.

Allgemeine Literatur

Verschiedene Studien wie die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), deren Zwischenbericht von 2006 (Feldrappe 2006), die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2013) sowie das Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland (Reinhold et al. 2011) kommen zur Anwendung. Diese wurden zur Beurteilung der mit dem 3D-Modell erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse (siehe Tabelle 153 und Tabelle 156) wurden auf die lithologischen Abfolgen des Dogger geprüft.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt ist.

Außerdem wurden die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb des Landesgrenzen von Niedersachsen, Hamburg und Bremen geprüft. 57 Bohrungen erfüllen dabei die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in der auf Grundlage des 3D-Modells ausgewiesenen Fläche. Diese zeigen Tongehalte zwischen 60 % und teilweise mehr als 80 % und kumulative Mächtigkeiten zwischen 101 m und 1029 m in den Stufen Aalenium, Bajocium und Callovium. Beispielhaft seien hier die Bohrungen Oberg Z 1/1991, Vechelde 3/1954, Burgmoor Z1/1992, Kalkriese 1/1937 sowie Quetzen 1/1955 im Dogger mit einem Tongehalt von mindestens 80 % und kumulativen Mächtigkeiten von 515 m, 295 m, 292 m, 5 m, 268 m und 489 m genannt.

Die Auswertung der der BGE vorliegenden Schichtenverzeichnisse des LBEG zeigte in den relevanten Regionen ebenfalls Tonformationen, die die Mindestanforderungen der Mindestmächtigkeit sowie der Teufenlage erfüllen. Exemplarisch werden die Bohrungen B 105 – Rudolfshall-II Bennigsen mit einer Mindestmächtigkeit von 181 m, Wesendorf-Sued 14 mit einer kumulativen Mächtigkeit von 275 m sowie Wesendorf-Sued 15 mit einer kumulativen Mächtigkeit von 264 m genannt.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998;

Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen. Lithotypen, deren Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die diese Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit Gebirgsdurchlässigkeit kleiner gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Jedoch weisen Hoth et al. (2007) darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse, zeigen Bereiche in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit, teilweise oder nicht erfüllt ist.

Wie aus der Inventarisierungstabelle (vgl. Kapitel 5) zu entnehmen ist, sind die Tongesteinsformationen des Dogger teilweise inhomogen aufgebaut. Neben Ton- und Tonmergelstein, die dominant vorliegen, enthalten die Formationen teilweise Einschaltungen von z. B. Mergel(ton)stein und unreinen Sand- und Schluffsteinen. Häufig kommen Einschaltungen von Toneisensteingeoden vor. Die Auswertung der Bohrungsdaten der Tonstudie zeigt 57 Bohrungen mit Tongehalten zwischen 60 und teilweise mehr als 80 %. Beispielhaft seien hier die Bohrungen Oberg Z 1/1991, Vechelde 3/1954, Burgmoor Z1/1992, Kalkriese 1/1937 sowie Quetzen 1/1955 im Dogger mit einem Tongehalt von mindestens 80 % und kumulativen Mächtigkeiten zwischen 268 m und 515 m genannt. Diese bestätigen das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit (Hoth et al. 2007).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Mittleren Jura für die verbleibenden Gebiete **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Dogger wurde im 3D-Raum berechnet. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Topfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Dogger zusammen.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden Bohrdaten der Tonstudie und Schichtenverzeichnisse von Bohrungen aus Bohrdatenbanken hinsichtlich der Mächtigkeiten

größer 100 m der Ablagerungen im Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium geprüft. Da insgesamt 57 Bohrungen der Tonstudie (z. B. Oberg Z 1/1991, Vechelde 3/1954, Burgmoor Z1/1992, Kalkriese 1/1937 sowie Quetzen 1/1955) (Hoth et al. 2007) sowie die exemplarisch genannten Bohrungen B 105–Rudolfshall-II Bennigsen, Wesendorf-Sued 14 sowie Wesendorf-Sued 15 der Bohrdatenbanken des LBEG in den ausgewiesenen Flächen in Niedersachsen im Dogger Mächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Dogger wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Des Weiteren wurden Bohrdaten hinsichtlich der Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m unter der Geländeoberkante geprüft. Da 57 Bohrungen der Tonstudie (z.B. Oberg Z 1/1991, Vechelde 3/1954, Burgmoor Z1/1992, Kalkriese 1/1937 sowie Quetzen 1/1955; Hoth et al., 2007) sowie die exemplarisch genannten Bohrungen B 105–Rudolfshall-II Bennigsen, Wesendorf-Sued 14 sowie Wesendorf-Sued 15 der Bohrdatenbanken des LBEG in den ausgewiesenen Flächen in Niedersachsen im Dogger Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m zeigen, wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für das verbleibende Gebiet als zunächst **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg in angrenzenden Bundesländern fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Niedersachsen können Gebiete ausgewiesen

werden, in denen die Formationen des Dogger alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 68).

Ergebnis

In Abbildung 68 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Dogger in Niedersachsen, Hamburg und Bremen dargestellt.

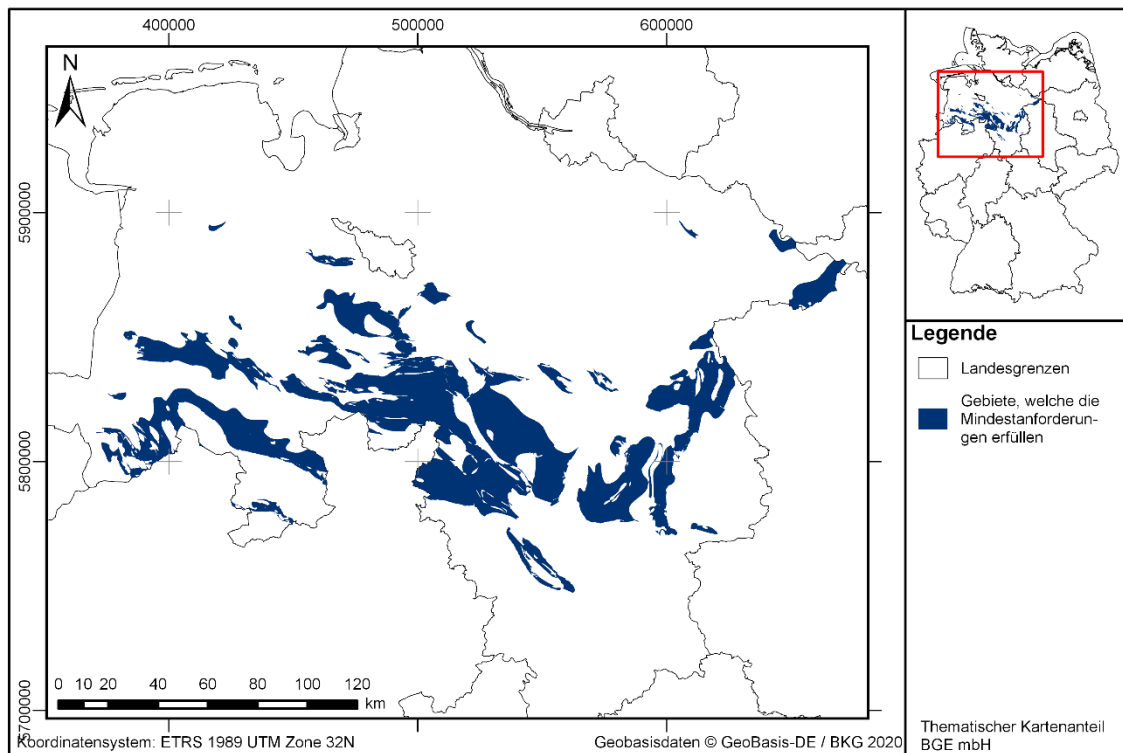


Abbildung 68: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Dogger in Niedersachsen, Hamburg und Bremen.
Die Landesgrenzen sind in schwarz abgebildet. Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, sind in blau dargestellt.

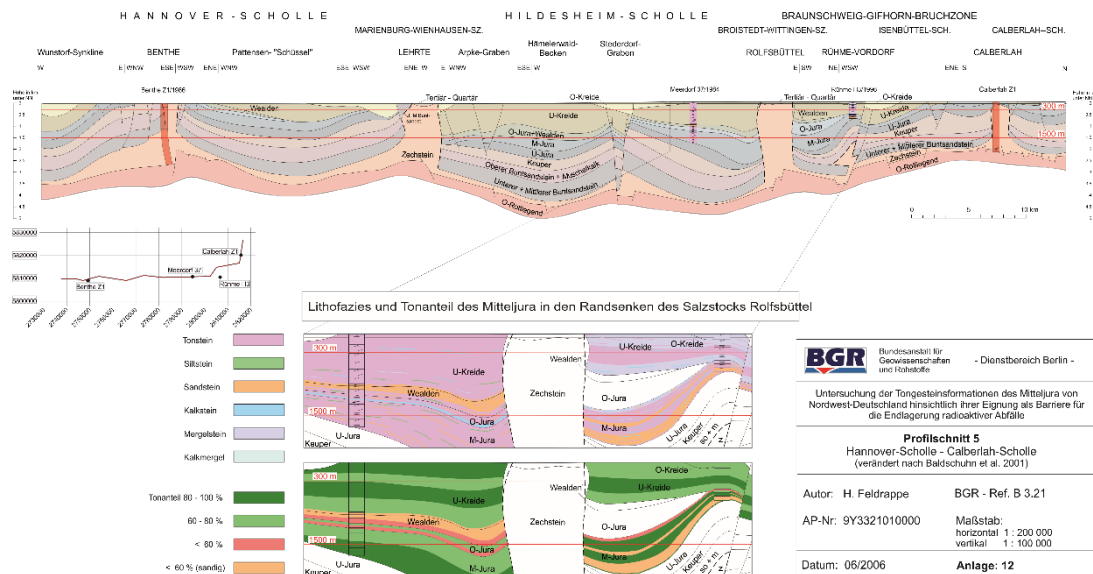


Abbildung 69: Profilschnitt von der Wunstorf-Syncline zur Calberlah-Scholle (Feldrappe 2006)

Eine Auflistung dieser die Mindestanforderungen erfüllenden Gebiete ist in Tabelle 155 zu finden. Abbildung 69 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge der ausgewiesenen Gebiete.

Tabelle 155: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km² befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Dogger_NI_1	2841
MG_t_Dogger_NI_2	862
MG_t_Dogger_NI_3	755
MG_t_Dogger_NI_4	535
MG_t_Dogger_NI_5	442
MG_t_Dogger_NI_6	374
MG_t_Dogger_NI_7	191
MG_t_Dogger_NI_8	126
MG_t_Dogger_NI_9	110
MG_t_Dogger_NI_10	57
MG_t_Dogger_NI_11	57

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Dogger_NI_12	51
MG_t_Dogger_NI_13	51
MG_t_Dogger_NI_14	50
MG_t_Dogger_NI_15	47
MG_t_Dogger_NI_16	45
MG_t_Dogger_NI_17	29
MG_t_Dogger_NI_18	21
MG_t_Dogger_NI_19	19
MG_t_Dogger_NI_20	19
MG_t_Dogger_NI_21	16
MG_t_Dogger_NI_22	13
MG_t_Dogger_NI_23	12
MG_t_Dogger_NI_24	11
MG_t_Dogger_NI_25	11
MG_t_Dogger_NI_26	11
MG_t_Dogger_NI_27	11
MG_t_Dogger_NI_28	10
MG_t_Dogger_NI_29	10
MG_t_Dogger_NI_30	10
MG_t_Dogger_NI_40	6
MG_t_Dogger_NI_52	3
MG_t_Dogger_NI_59	1
MG_t_Dogger_NI_68	1
MG_t_Dogger_NI_75	1
MG_t_Dogger_NI_83	<1
MG_t_Dogger_NI_107	<1
MG_t_Dogger_NI_168	<1
MG_t_Dogger_NI_185	<1
MG_t_Dogger_NI_200	<1
MG_t_Dogger_NI_206	<1
MG_t_Dogger_NI_207	<1

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Dogger_NI_216	<1
MG_t_Dogger_NI_238	<1
MG_t_Dogger_NI_249	<1
MG_t_Dogger_NI_254	<1
MG_t_Dogger_NI_255	<1
MG_t_Dogger_NI_255	<1

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 156 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 156: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11842295	7775		BGE-GTA3D		3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
11880284	8434		Tiefenmodell Hamburg		3D-Modell von Hamburg mit 2 Basis- und 1 Topfläche
11884574	8906	2385811	Norddeutschland_West	Schichtenverzeichnisse Oberg Z 1/1991, Vechelde 3/1954, Burgmoor Z1/1992, Kalkriese 1/1937 sowie Quetzen 1/1955	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
11881514	9105	2389926	BDNGeodin-Export Niedersachsen tiefer 300m 2. Teil	Schichtenverzeichnisse B 105 – Rudolfshall-II Bennisgen, Wesendorf-Sued 14 sowie Wesendorf-Sued 15	Landes-Bohrdatenbank Niedersachsen (LBEG) 2. Teil

1.3.17 Mittlerer Jura – Nordrhein-Westfalen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Dogger, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann (vgl. Kapitel 5.1). Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet Nordrhein-Westfalen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Dogger erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Nordrhein-Westfalen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie: Jura, Mittlerer Jura (Dogger)

Der Mittlere Jura, der mit der informellen Bezeichnung Dogger in Norddeutschland vertreten ist (Mönnig et al. 2018), kann in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Alle Stufen sind in Nordrhein-Westfalen verbreitet. Auf Basis von allgemein verfügbaren Informationen (z. B. Grabert 1998a) wurden auf Basis der Inventarisierung der stratigraphischen Einheit Mittlerer Jura (vgl. Kapitel 5) die Stufen Aalenium und Bajocium und Callovium in Nordrhein-Westfalen als potentiell Tongestein mit fraglicher Lithologie im Sinne der Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) eingestuft. Da sich das Verbreitungsgebiet an die in Niedersachsen identifizierten Tongesteinsvorkommen des Dogger anschließt, wird die Eignung des Dogger im folgenden Protokoll geprüft und dessen Verbreitung ggf. ausgewiesen.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Doggers und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Nordrhein-Westfalen (Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Weser- und Osnabrücker Bergland, Nord- und Westmünsterland

Der Mitteljura (Dogger) ist nicht flächendeckend in Nordrhein-Westfalen verbreitet. Die Verbreitung beschränkt sich auf den Norden und Osten des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen. Das südlichste Vorkommen vom Oberen Dogger wurde am östlichen Rand des Eger-Gebirges nachgewiesen (Grabert 1998a).

Fazies/Ablagerungsraum

Im Dogger setzte sich die tonige Sedimentation des Lias fort. Sandschüttungen von Norden unterbrechen die tonige Sedimentation, sodass ab dem Ober-Aalenium und Bajocium häufige lithofazielle Wechsel erfolgen. Besonders die Stufen des Aalenium und Bajocium bestehen aus marinen Tonsteinabfolgen, die auf einem flachen Epikontinentalmeer abgelagert wurden. Mit der Ton-dominierten Ornatenton-Formation des oberen Callovium schließt der Dogger im östlichen Landesteil ab (Grabert 1998a).

Lithologie

Tonsteine dominieren die Ablagerungen des Dogger. Das Bathonium ist von Sandstein und Kalkstein geprägt (Grabert 1998a). Die Stratigraphische Gliederung des Jura gibt einen Überblick über die auftretenden Einheiten und vorherrschenden Gesteine (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016). Als Tongestein ausgewiesene Einheiten werden im Folgenden kurz lithologisch beschrieben:

Opalinuston-Formation: Ton- und Mergelstein, z. T. feinsandig, z. T. mit Kalk- oder Kalksandsteinbänken sowie Tonsteingeoden (marin), nimmt den basalen Teil des Aalenium ein (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016).

polyplocus-Schichten: Ton- und Mergelstein, z. T. feinsandig, z. T. mit Kalk- oder Kalksandsteinbänken sowie Tonsteingeoden (marin), nimmt den oberen Teil des Aalenium und den basalen Teil des Bajocium ein (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016).

Das Bajocium kann in die Einheiten, Coronaten-Schichten, Subfurcaten-Schichten und *parkinsoni*-Schichten untergliedert werden (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016): Ton- und Mergelstein, z. T. feinsandig, z. T. mit Kalk- oder Kalksandsteinbänken sowie Tonsteingeoden (marin).

Gesteine des Bathonium werden nicht als Tongestein identifiziert, da sie von dem mächtigen Württembergica-Sandstein gebildet werden und den Sandstein-Abfolgen der Porta-Schichten überlagert werden, die den basalen Teil des Callovium bilden.

Die Ornatenton-Fm. bildet den oberen Teil des Callovium (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2016): Ton- und Mergelstein, z. T. feinsandig, z. T. mit Kalk- oder Kalksandsteinbänken sowie Tonsteingeoden (marin).

Mächtigkeit

Die Abfolge des Dogger tritt in Nordrhein-Westfalen mit einer Mächtigkeit zwischen 200 m und 300 m auf (Grabert 1998a).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 157). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Es wurden vom Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW) GIS-Dateien der Verbreitung von Tongesteinen der Lias-Dogger Abfolge innerhalb des Teufenbereiches zwischen 300 m und 2.000 m u. GOK geliefert (DokID_11842255/141/9367). Zudem erging der Hinweis darauf, dass diese vorgeschlagenen Gebiete auf dem „Geologischen 3D-Landesmodell“ basieren, das für weite Teile von Nordrhein-Westfalen als grobe Übersichtsdarstellung vorliegt.

Die BGE hat die durch den GD NRW bereitgestellten Informationen zur Verbreitung geeigneter Tongesteinshorizonte in Nordrhein-Westfalen hinsichtlich ihrer Nachvollziehbarkeit geprüft. Die Nachvollziehbarkeit der gelieferten Shape-Dateien wurde anhand von durch den GD NRW übermittelten Bohrungen sowie dem geologischen Landesmodell Nordrhein-Westfalen bewertet.

Bei der vor dem Hintergrund der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG vorgenommenen Prüfung der Nachvollziehbarkeit der durch den GD NRW übergebenen Informationen zum Tongesteinshorizont Lias-Dogger kommt die BGE zu der Einschätzung, dass die Prüfung hinsichtlich des Kriteriums Teufenlage nicht möglich ist.

Daher erfolgt die Ausweisung von Gebieten, die alle Mindestanforderungen erfüllen, nach dem Konzept der Anwendung der Mindestanforderungen der BGE (vgl. Kapitel 6 in BGE 2020j).

Tabelle 157: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales Gelände- Modell

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Beschreibung
3	NW	GD NRW	11883267/ 8849	ts	Landesmodell_NRW	3D-Landesmodell von Nordrhein-Westfalen
4	DE	BGR	11844870_ 01/ 6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
5	DE	BGR	11897915_ 02/9574/24 93968	pdf	Feldrappe_2006_Tongesteinsinformationen jm NWD_2020	Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2006)
6	DE	BGR	11897915_ 02/9575/24 93968	tif	Anlage-1	Verbreitung des Mitteljura mit ausgewählten Bohrungen in NW-Deutschland. Aus dem Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2006)
9	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Norddeutschland_West	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
10	NW	GD NRW	11842255/ 7535	shp	Lias_Dogger_b_ct	Basis der Einheit Lias-Dogger, vom GD NRW ausgewiesenes Gebiet, in dem die MA erfüllt sind
11	NW	GD NRW	11842255/ 7536	shp	Lias_Dogger_t_ct	Top der Einheit Lias-Dogger, vom GD NRW ausgewiesenes Gebiet, in dem die MA erfüllt sind
12	NW	GD NRW	11842255/ 7537	shp	Lias_Dogger_Verbreitung	Gelieferte Verbreitungsgrenze innerhalb der die MA erfüllt sind (Lias-Dogger)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
13	NW	GD NRW	11842255/ 9367	pdf	2018_06_25_BGE_Datenlieferung_Mindestanforderungen_Antwortschreiben_Anlagen	Anschreiben zur Datenlieferung MA des GD NRW

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Dogger in Nordrhein-Westfalen geprüft wurde, ist in Tabelle 158 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 158: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Unterkreide aus der Basisfläche Unterkreide	b_Lias-Dogger_NW.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Lias-Dogger_NW_MACRORESULT.ts
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Lias-Dogger_NW_MACRORESULT_qs.ts
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_ju-jm_NW.dxf MG_t_ju-jm_NW.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 06_Dogger_Nord
a) Umwandlung der DXF-Fläche aus 2h) in ein 2D-shape	MG_t_jujm_NWP.shp
b) Vektorisierung des Verbreitungsgebietes des Dogger in Anlage 1.tif aus Feldrappe (2006) in ArcGIS Pro	Verbreitungsgrenze_Dogger_NW_clip.shp
c) Zusammenführen der Flächen zu Einzelobjekten mit dem Werkzeug „Dissolve“	MG_t_jujm_NWP_Dissolve_Clip.shp
d) Verschneiden der Fläche aus 3a) mit der Verbreitungsgrenze aus 3b) mit dem Werkzeug „Ausschneiden“	MG_t_jujm_NWP_Dissolve_Clip.shp
e) Entfernen aller Flächen mit einer Fläche kleiner als 10 km ² (mit Ausnahme von Gebieten an Bundeslandgrenzen) und Benennung der Gebiete	MG_t_jujm_NWP_Dissolve_Clip_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 158 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell Nordrhein-Westfalen ist ein Übersichtsmodell, dessen Grundlage häufig auf Ergebnissen aus unterschiedlichen Projekten beruht, deren Ergebnisflächen untereinander nicht konsistent abgestimmt wurden. Datenbasis und somit die Genauigkeit sind regional sehr unterschiedlich. Die Basisflächen Karbon Basis, Mitteldevon Basis, sowie die Einheiten „Emscher Formation“ und „Wealden Formation“ wurden nicht vollständig modelliert und sind lediglich angenäherte Darstellungen, um eine ungefähre Vorstellung von Tiefenlage und Mächtigkeit zu vermitteln.

Das Landesmodell weist eine Top- und elf Basisflächen für stratigraphische Einheiten sowie jeweils eine Top- und Basisfläche für Formationen auf:

- gg_q_b (Quartär Basis)
- gg_t_b (Tertiär Basis)
- gg_kroha_b (Halterner Sande Basis)
- gg_kro_b (Oberkreide Basis)
- gg_kr_b (Kreide Basis)
- gg_j_b (Jura Basis)
- gg_tr_b (Trias Basis)
- gg_z_b (Zechstein Basis)
- gg_r_b (Rotliegend Basis)
- gg_praep_t (Präperm Top)
- gg_c_b (Karbon Basis, unvollständig)
- gg_dm_b (Mitteldevon Basis, unvollständig)

Formationen:

- Emscher_Form_t (Emscher Formation Top, unvollständig)
- Emscher_Form_b (Emscher Formation Basis, unvollständig)
- Wealden_t (Wealden Top, unvollständig)
- Wealden_b (Wealden Basis, unvollständig)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 158 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Lias-Dogger wurde aus dem Landesmodell die Fläche „Jura Basis (gg_j_b)“ verwendet, da das Landesmodell keine interne Differenzierung des Jura beinhaltet (Tabelle 158, 2b).

Das digitale Geländemodell für Nordrhein-Westfalen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 158, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 158, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 158, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Lias-Dogger sowie der Topfläche berechnet (Tabelle 158, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen der Unterkreide, der Oberkreide, des Tertiär und Quartär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 158, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m

u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche Lias-Dogger wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 158, 2g). Des Weiteren wurde die Plausibilität der Bearbeitungsfläche Lias-Dogger anhand von 2D-Profileschnitte kontrolliert. Die Bearbeitungsfläche Lias-Dogger wurde mit der Verwaltungsgrenze VG250 verschnitten und auf Bereiche innerhalb Nordrhein-Westfalens beschränkt.

Die Bearbeitungsfläche Lias-Dogger wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 158, 2h).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der gesamte Datensatz in einzelne Flächen getrennt, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen werden konnten. Anschließend wurde die Fläche aus dem 3D-Modell mit der digitalisierten und vektorisierten Verbreitungsgrenze aus Feldrappe (2006) verschnitten, sodass alle Gebiete außerhalb der Verbreitungsgrenze entfernt wurden (Tabelle 158, 3d). Zum Schluss erfolgte die Prüfung des Flächenbedarfs von 10 km². Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt, mit Ausnahme von Gebieten, die an der Grenze zu Niedersachsen liegen und dort fortgeführt werden (Tabelle 158, 3e).

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Feldrappe 2006; Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011; Reinhold et al. 2013) herangezogen und Bohrdaten, hauptsächlich Schichtenverzeichnisse aus den in Tabelle 157 aufgelisteten Bohrdatenbanken, auf die lithologischen Abfolgen des Mittleren Jura geprüft.

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bildet die „Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen“ zur Verbreitung des Doggers in Sachsen-Anhalt (Grabert 1998a). Unterstützend findet die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), dessen Zwischenbericht von 2006 (Feldrappe 2006) sowie die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2013) Anwendung.

Diese Studien wurden zur weiteren Beurteilung der mit dem verwendeten Kartenmaterial erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse (siehe Tabelle 157 und Tabelle 160) wurden auf die lithologischen Abfolgen des Dogger geprüft.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt ist.

Außerdem wurden die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Aalenium, Bajocium und Callovium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Landesgrenzen von Nordrhein-Westfalen geprüft. Die exemplarisch genannten Bohrungen Ellerbürg Z1/1967 und Wegholm 1/1955 erfüllen dabei die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in der auf Grundlage des 3D-Modells ausgewiesenen Fläche. Diese zeigen für die Stufen Aalenium und Bajocium Tonformationen mit Tongehalten von mindestens 65 % in Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m und kumulative Mächtigkeiten zwischen 141 m und 253 m.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen. Lithotypen, deren Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die diese Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Jedoch weisen Hoth et al. (2007) darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herange-

zogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils - Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit, teilweise oder nicht erfüllt ist.

Wie aus der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) zu entnehmen ist, sind die Tongesteinsformationen des Dogger teilweise inhomogen aufgebaut. Neben Ton- und Tonmergelstein, die dominant vorliegen, enthalten die Formationen teilweise Einschaltungen von z. B. Mergel(ton)stein und unreinen Sand- und Schluffsteinen. Bohrungsdaten der Tonstudie (Ellerburg Z1/1967 und Wegholm 1/1955) in den Stufen Aalenium und Bajocium mit Tongehalten von mindestens 65 % und teilweise mehr als 80 % in einer Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m und kumulativen Mächtigkeiten zwischen 141 m und 253 m bestätigen das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mindestens teilweise (Hoth et al. 2007).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Mittleren Jura für die verbleibenden Gebiete in Nordrhein-Westfalen **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Lias-Dogger wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Jura inklusive Malm zusammen. Als geeignete Tongesteine wurden jedoch lediglich die Stufen des Aalenium, Bajocium und Callovium ausgewiesen. Es ist daher anzunehmen, dass nur in Teilen des ausgewiesenen Gebiets eine Mächtigkeit des Tongesteins von 100 m erreicht wird. Dennoch werden für die angegebenen Stufen in den betrachteten Gebieten Mächtigkeiten von zum Teil deutlich mehr als 100 m beschrieben. Zum jetzigen Zeitpunkt kann jedoch keine weitere Eingrenzung vorgenommen werden.

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden Bohrdaten der Tonstudie geprüft. Da mindestens zwei Bohrungen in den ausgewiesenen Flächen in Nordrhein-Westfalen (kumulative) Mächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Lias-Dogger wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Des Weiteren wurden Bohrdaten hinsichtlich der Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m unter der Geländeoberkante geprüft. Da mindestens zwei (exemplarisch genannte) Bohrungen in den ausgewiesenen Flächen in Nordrhein-Westfalen im Aalenium, Bajocium und Callovium Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m zeigen, wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für das verbleibende Gebiet als zunächst **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher für das verbleibende Gebiet als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Nordrhein-Westfalen können Gebiete ausgewiesen werden, in denen die Formationen des Mittleren Jura alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell vorgestellt (Abbildung 70).

Ergebnis

In Abbildung 70 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Dogger in Nordrhein-Westfalen dargestellt.

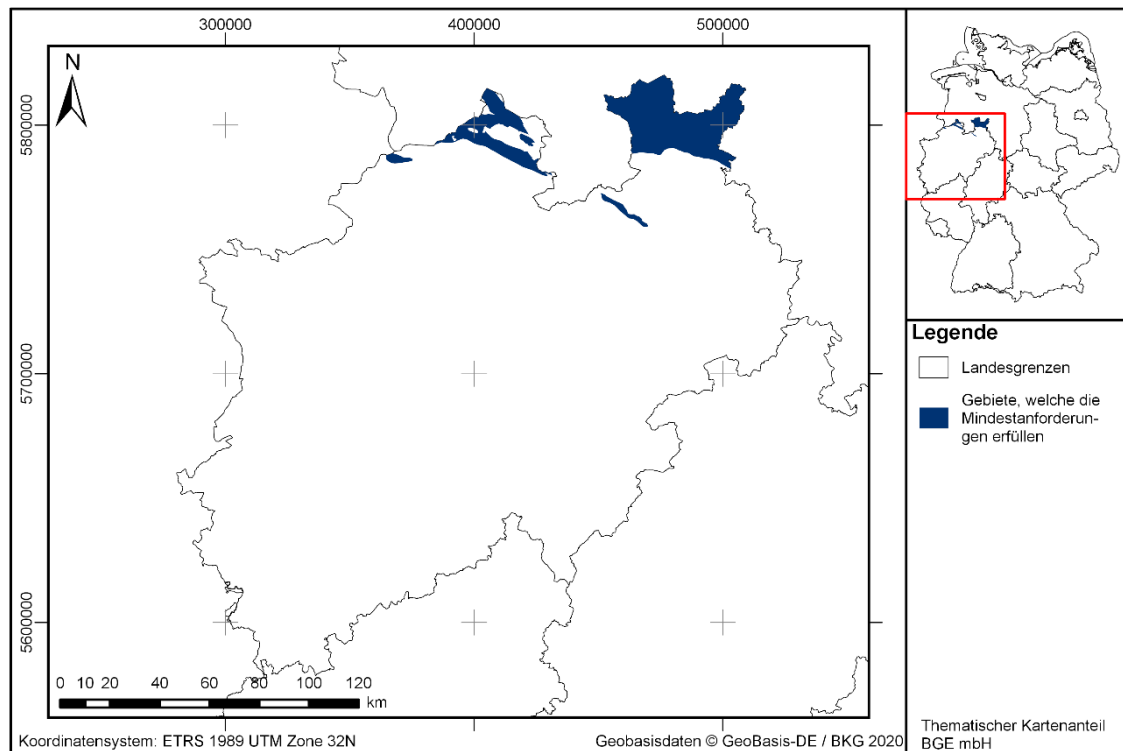


Abbildung 70: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Mittleren Jura in Nordrhein-Westfalen. Die Landesgrenzen sind in schwarz abgebildet. Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, sind in blau dargestellt.

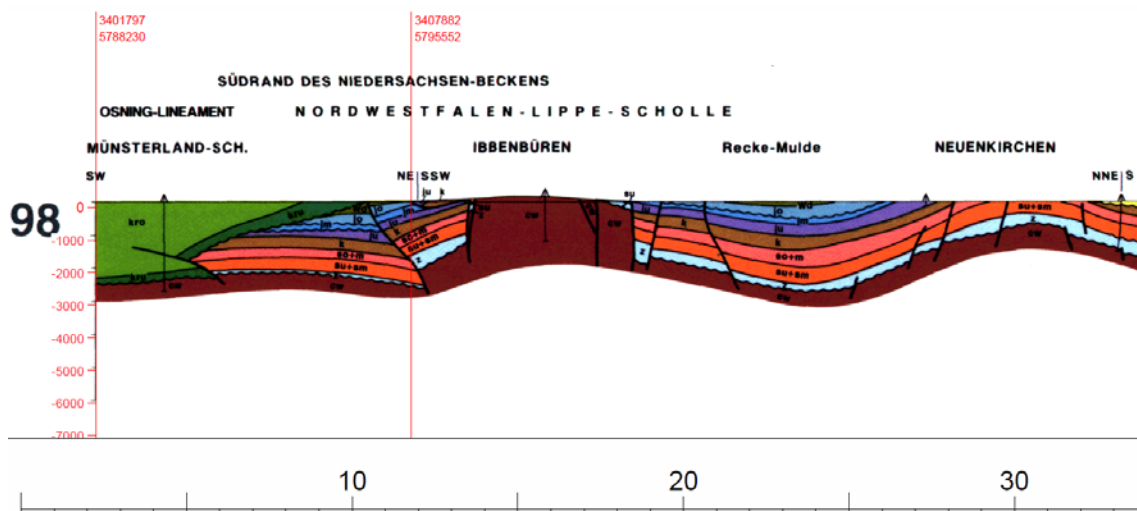


Abbildung 71: Ausschnitt aus dem Profilschnitt von der Münsterländer Scholle über die Nordwestfalen-Lippe-Scholle bis zur Recke-Mulde im NNE aus dem Geotektonischen Atlas, Profil 98 (Baldschuhn et al. 2001). Am Südrand des Niedersächsischen Beckens, südlich der Nordwestfalen-Lippe-Scholle befinden sich die Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen. Eine Auflistung dieser die Mindestanforderungen erfüllende Gebiete ist in Tabelle 159 zu finden. Abbildung 71 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge der ausgewiesenen Gebiete.

Tabelle 159: *Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche). Flächen, die kleiner sind als 10 km² befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.*

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Dogger_NW_1	1060
MG_t_Dogger_NW_2	380
MG_t_Dogger_NW_3	43
MG_t_Dogger_NW_4	27
MG_t_Dogger_NW_5	15
MG_t_Dogger_NW_7	1

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 160 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 160: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank*

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11883267	8849		Landesmodell_NRW		3D-Landesmodell von NRW
11884574	8906		Norddeutschland_West	Schichtenverzeichnisse Ellerburg Z1/1967 und Wegholm 1/1955	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
11897915_02	9575	2493968	Anlage-1	Verbreitungsgrenze des Mitteljura in Nordrhein-Westfalen	Verbreitung des Mitteljura mit ausgewählten Bohrungen in NW – Deutschland. Aus dem Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2006)

1.3.18 Mittlerer Jura – Mecklenburg-Vorpommern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann (vgl. Kapitel 5.1). Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet Mecklenburg-Vorpommern.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie: Jura, Mittlerer Jura (Dogger)

Der Mittlere Jura, der mit der informellen Bezeichnung Dogger in Norddeutschland vertreten ist (Mönnig et al. 2018), kann in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Alle Stufen sind in Mecklenburg-Vorpommern unter Überdeckung von jüngeren Ablagerungen verbreitet. Aufgrund der Inventarisierung der stratigraphischen Einheit Mittlerer Jura (vgl. Kapitel 5) werden im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) die Stufen des Bathonium und Callovium betrachtet.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Mittleren Jura und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Mecklenburg-Vorpommern entnommen werden (Kapitel 5.1).

Geographische Verbreitung

Südliches Mecklenburg sowie östliches Vorpommern (Petzka et al. 2004)

Der Mittlere Jura ist nicht flächendeckend in Mecklenburg-Vorpommern vorhanden. Nahezu flächendeckend verbreitet ist der Mittlere Jura im südlichen Mecklenburg sowie im

östlichen Vorpommern. Dort fehlt der Mittlere Jura lediglich im Bereich von Salzstrukturen und deren direkter Umrandung. In Vorpommern ist Greifswald als südöstliche Begrenzung zu sehen (Petzka et al. 2004).

Fazies/Ablagerungsraum

Im Mittleren Jura veränderte sich die paläogeographische Situation, als sich Gondwana von Laurasien endgültig abtrennte und sich der Zentralatlantik und der Penninische Ozean öffneten. Das Nordmeer drang nach Mitteleuropa vor, im Süden bestand eine Verbindung zur Neotethys. Des Weiteren waren das Norddeutsche und das Süddeutsche Becken im Mittleren Jura über die Hessische Senke miteinander verbunden (Mönnig et al. 2018).

Das Mitteleuropäische Becken gliederte sich auf, sodass sich zunehmend Senkungsstrukturen in NW-SE-Richtung bildeten (Meschede 2018; Beutler & Mönnig 2008). Mitteleuropa war von einem flachen Epikontinentalmeer überflutet, das zur Ablagerung von mächtigen Tonabfolgen führte. Marine Einflüsse kamen neben den westlichen Richtungen auch aus dem Nordosten (z. B. Zentrum der Dänisch-Polnischen Senke; Petzka et al. 2004). Es kam zu einem Wechsel von marinen und brackischen Bedingungen, wobei der marine Anteil im Verlauf des Mittleren Jura deutlich zunahm (Petzka et al. 2004).

Ab dem Ober-Aalenium und Bajocium erfolgten häufige lithofazielle Wechsel von fluviatildeltaischen Sandsteinen und mächtigen marinen Ton- und Siltsteinen mit Einschaltungen von Brauneisen- und Siderit-Ooiden. Die Schüttungsrichtung änderte sich von Ost zu Nord (z. B. Ringkobing-Fyn-Hoch, Nordwestmecklenburg-Schwelle) (Petzka et al. 2004; Mönnig 2008). Im Bathonium kam es verstärkt zu Sandschüttungen von Fein- bis Mittelsandsteinen sowie Kalk- bis Kalksandsteinen („Cornbrash“; Schudack & Tessin 2015). Ab dem Callovium dominierten wiederum tonige Ablagerungen (Ornatenton-Formation).

Lithologie (Petzka et al. 2004)

Aalenium (Petzka et al. 2004): Der basale Teil des Aaleniums in Südwest-Mecklenburg wird von 10 m bis 20 m mächtigen Tonsteinen gebildet. Nach Norden und Osten ist dagegen der Dogger-Beta-Sandstein ausgebildet. Dieser reicht bis in die nördliche Randsenke des Diapirs Kraak. In Vorpommern ist kein sicheres Aalenium nachgewiesen, jedoch Ablagerungen von schluffigen Sanden (Wusterhusener Schichten).

Bajocium (Petzka et al. 2004): Das Bajocium wird nicht als geeigneter Tongesteinshorizont betrachtet, da es durch sandig-tonige Sedimentation gekennzeichnet ist. Die basalen dunklen, tonigen Ablagerungen im Raum Greifswald-Anklam-Usedom werden zum Hangenden zunehmend heller und schluffig-sandiger; vereinzelt wurde Parkinsonien gefunden, womit ein teilweise mariner Charakter bestätigt ist. Der Sandgehalt nimmt deutlich nach Nordwesten zu, eine Abgrenzung des Ober-Bajociums vom Bathonium ist dort nicht möglich.

Bathonium (Petzka et al. 2004): Das Bathonium ist in Südwest-Mecklenburg nicht kontinuierlich abgelagert. Über den Ablagerungen des Unter-Bathoniums ist das Ober-Bathonium, bestehend aus Ammoniten führenden Tonen, untergeordnet aus Schluffen und Sanden, transgressiv abgelagert. Charakteristisch sind besonders Brauneisen-Ooide und kalkige, dolomitische Sedimente. In Vorpommern bei Heringsdorf fehlt ebenfalls das mittlere Bathonium. Das Ober-Bathonium ist marin-tonig ausgebildet, im Nordwesten ist es brackisch beeinflusst mit schluffig-sandigen Einschaltungen. Hier kommen aus Siderit bestehende oolithische Lagen vor.

Callovium (Petzka et al. 2004): In Vorpommern besteht das Unter-Callovium im unteren Teil aus Mergeln, der Sand-Gehalt nimmt zum Hangenden zu. Das Mittel-Callovium besteht im Liegenden aus braunen Mergeln. Im Hangenden und in Nordwest-Richtung nimmt der Sandgehalt zu. Das Ober-Callovium besteht aus schwach kalkhaltigen Tonsteinen bis Mergeln, die noch einzelne Sideritlagen enthalten. In Südwest-Mecklenburg besteht das Callovium aus Ton-Mergelsteinen.

Mächtigkeit (Petzka et al. 2004)

Das Unter-Bathonium ist zwischen 60 m und 190 m mächtig. Die Mächtigkeit des Ober-Bathoniums ist nicht bekannt, jedoch können kumulativ mit den Ablagerungen des Calloviiums Mächtigkeiten von mehr als 100 m erreicht werden.

In Vorpommern betragen die Mächtigkeiten des unteren Callovium 30 m – 70 m, des mittleren Calloviiums 0 m bis 50 m und des oberen Calloviiums bis zu 16 m. In Südwest-Mecklenburg beträgt die Mächtigkeit des Calloviiums zwischen 50 m und 200 m mit Extremwerten von 800 m in der sekundären Randsenke des Salzstocks Werle. Die kumulativen Mächtigkeiten des Calloviiums betragen zwischen 46 m und 136 m in Vorpommern und zwischen 50 m und 200 m in Südwest-Mecklenburg.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 161). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N/ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 161: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/772 8	shp	Verwaltungsgebiete (VG25)	Verwaltungsgrenzen

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
2	DE	BGR	11844870_01/ 6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
3	DE	BGR	11897915/955 9	pdf	Tongesteine als Barriere_jm_NE-D	Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2003)
3	DE	BGR	11884574/890 6	mdb	Norddeutschland_Ost	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
4	MV	LUNG	11888776/916 4	mdb	LUNG_SVZ_Kurz_20 20_02_06	Schichtenverzeichnisse Bohrdatenbank Mecklenburg-Vorpommern
5	DE	BGR	11844870/681 9	shp	Salzstrukturen_Inspee_v1_poly	Umrise der Salzstrukturen in Norddeutschland (Inspee; von Goerne et al. 2016)
6	DE	BGR	11897915/956 0	tif	Anlage-10_ob	Lithofazies des Bathonium aus dem Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2003)
7	DE	BGR	11897915/956 0	tif	Anlage-11_ob	Lithofazies des Callovium aus dem Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2003)

Eigenrecherche

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

Kölbel (1972): Dogger: Bathon. 1:500.000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura.

- Verbreitung von Ablagerungen im Bathonium mit Angaben zur Lithologie

Kölbel (1972c): Dogger: Callov. 1:500.000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura.

- Verbreitung von Ablagerungen im Callovium mit Angaben zur Lithologie

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Mittleren Jura in Mecklenburg-Vorpommern geprüft wurde, ist in Tabelle 162 aufgeführt. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse im Folgenden erläutert.

Tabelle 162: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) Import der Daten (Landesgrenzen, Karten etc.) in ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 06_Dogger_Nord
b) Georeferenzierung des Verbreitungsgebietes des Bathoniums und des Calloviums aus Kölbel (1972) und Kölbel (1972c) in ArcGIS Pro	Bathon.jpg Callov.jpg
c) Georeferenzierung der Karten „Lithofazies des Calloviums in Nordost – Deutschland“ und „Lithofazies des Bathoniums in Nordost – Deutschland“ aus Felddrappe (2003)	Anlage-10_oB.tif Anlage-11_oB.tif
d) Vektorisierung der (kumulativen) Verbreitungsgrenzen aus b) und der Grenzen der tonigen Faziesausbildung aus c); Ausschneiden des Salzstocks Werle (InSpEE)	MV_t_Dogger_Verbreitung_VG251.shp

2D-Bearbeitung

Für das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern steht für Tongestein des Mittleren Jura kein Geomodell zur Verfügung, sodass die Anwendung der Mindestanforderungen ausschließlich auf Basis paläogeographischer Karten, Bohrungen und Literaturangaben beruht. An der Bundeslandgrenze zu Brandenburg ist durch die bundeslandübergreifende geologische Modellierung eine Plausibilitätskontrolle der Mindestanforderungen „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG) und „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG) möglich.

Stratigraphische Einheiten, die potentiell relevante Tongesteine enthalten, die die Aufgaben des ewG übernehmen können, wurden im Vorhinein systematisch identifiziert (vgl. Kapitel 5.1). Die Auswertung der Karten, die in den Eingangsdaten aufgeführt sind, dienen als Grundlage für das Ausweisen von Gebieten die die Mindestanforderungen erfüllen. Einzelne Bohrungen belegen die generelle Erfüllung der Mindestanforderungen für die gesamte Fläche.

Kartenmaterial

Zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Tongestein im Mittleren Jura in Mecklenburg-Vorpommern wurden Verbreitungsgrenzen aus ausgewählten thematischen Karten georeferenziert (Tabelle 162, b und c). Die verwendeten Karten sind in den Eingangsdaten aufgelistet. Anschließend wurden aus diesen Karten die Verbreitungsgrenzen sowie die Grenzen der tonigen Lithofazies vektorisiert (Tabelle 162, d). Dabei wurden jeweils die Karten zur Verbreitung bei der Stufen (bzw. Verbreitung der tonigen Fazies des Bathonium und Callovium) übereinandergelegt und die maximale Verbreitung anhand der Verbreitungsgrenzen vektorisiert. Anschließend wurde anhand des Datensatzes des Projektes „InSpEE“ (von Goerne et al. 2016)(Tabelle 161) der Umriss des Salzstockes Werle aus der ausgewiesenen Fläche ausgeschnitten. Die Ergebnisse dieser Bearbeitung liegen als Polygon vor. Die Flächen wurden auf die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ von 10 km² geprüft und kleinere Gebiete ggf. entfernt.

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bildet das Kapitel „Jura“ der „Geologie von Mecklenburg-Vorpommern“ (Petzka et al. 2004) zur Verbreitung des Mittleren Jura in Mecklenburg-Vorpommern. Unterstützend findet die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), dessen Zwischenbericht von 2003 (Feldrappe 2003), die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2013) sowie das Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland (Reinhold et al. 2011) Anwendung.

Diese Studien wurden zur weiteren Beurteilung der mit dem verwendeten Kartenmaterial erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse (siehe Tabelle 161 und Tabelle 164) wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Mittleren Jura geprüft.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Bathoniums und Calloviums und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb des Landesgrenzen von Mecklenburg-Vorpommern geprüft. Drei Bohrungen erfüllen dabei die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in der auf Grundlage des Kartenmaterials ausgewiesenen Fläche. Es handelt sich hier um die Bohrungen E Penkun 1/1h2/1971, E Grabow 1/1956 und E Karstädt Nord 2/1957 in der stratigraphischen Einheit Callovium mit einem Tongehalt zwischen 60 und 80% und einer kumulativen Mächtigkeit zwischen 100 m und 210 .

Die Auswertung der der BGE vorliegenden Schichtenverzeichnisse des LUNG zeigte in den relevanten Regionen in weiteren 4 Bohrungen Tonformationen an, die die Mindest-

anforderungen der Mindestmächtigkeit sowie der Tiefenlage erfüllen. Dies sind die Bohrungen E Grabow 2/1957, E Karstädt Nord 3/1958, E Karstädt Nord 8/1958 sowie Gt Neustadt Glewe 2/1989 mit kumulativen Mächtigkeiten von 170 m bis 388 m.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen. Lithotypen, deren Tonanteile größer als 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die diese Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Jedoch weisen Hoth et al. (2007) darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit, teilweise oder nicht erfüllt ist.

Wie aus der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) zu entnehmen ist, sind die Tongesteinsformationen des Mittleren Jura teilweise inhomogen aufgebaut. Neben Ton- und Tonmergelstein, die dominant vorliegen, enthalten die Formationen teilweise Einschaltungen von z. B. Mergel(ton)stein oder unreinen Sandsteinen. Mit Hilfe der Lithologisch-paläogeographischen Karten der DDR (Kölbel 1972; Kölbel 1972c) sowie Fazieskarten aus Feldrappe (2003) konnten tonige Faziesbereiche im Südwesten und Südosten von Mecklenburg-Vorpommern identifiziert werden.

Weiterhin bestätigen Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) (E Penkun 1/1h2/1971, E Grabow 1/1956, E Karstädt Nord 2/1957) das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit einem Tonanteil von 60 %– 80 % in den ausgewiesenen Gebieten mindestens teilweise.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Mittleren Jura in den verbleibenden Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des ewG“ wurde, da die Gebiete nicht durch 3D-Modelle abgedeckt sind, anhand von Bohrdaten der Tonstudie sowie Schichtenverzeichnissen aus der Bohrdatenbank des LUNG hinsichtlich der Mächtigkeiten der Tongesteinsformationen im Bathonium und Callovium überprüft. Des Weiteren wurden thematische Karten zum Bathonium und Callovium (Kölbel 1972; Kölbel 1972c) hinsichtlich der Mächtigkeiten von mehr als 100 m geprüft. Die thematischen Karten von (Kölbel 1972; Kölbel 1972c) sowie insgesamt sieben Bohrungen in den verbleibenden Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern im Bathonium und Callovium zeigen (kumulative) Mächtigkeiten von mehr als 100 m. Daher wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ in den verbleibenden Gebieten als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)“

Für alle ausgewiesenen Flächen wurden Bohrdaten der Tonstudie sowie aus der Bohrdatenbank des LUNG hinsichtlich der Tiefenlage der Tongesteinsformationen im Bathonium und Callovium überprüft. Im Umfeld des Salzstocks Werle kann es in Randsenken zu Tiefenlagen von mehr als 1500 m kommen. Jedoch kann zum jetzigen Zeitpunkt auf Basis der vorliegenden Daten keine weitere Eingrenzung vorgenommen werden. Da insgesamt sieben Bohrungen aus der Tonstudie sowie der Bohrdatenbank des LUNG in den ausgewiesenen Flächen in Mecklenburg-Vorpommern im Bathonium und Callovium Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m anzeigen, wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ für die verbleibenden Gebiete in Mecklenburg-Vorpommern als zunächst **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg in angrenzenden Bundesländern fortgesetzt werden können. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Mecklenburg-Vorpommern können Gebiete ausgewiesen werden, in denen die Formationen des Mittleren Jura alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 72).

Ergebnis

In Abbildung 72 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Mittlerer Jura in Mecklenburg-Vorpommern dargestellt.

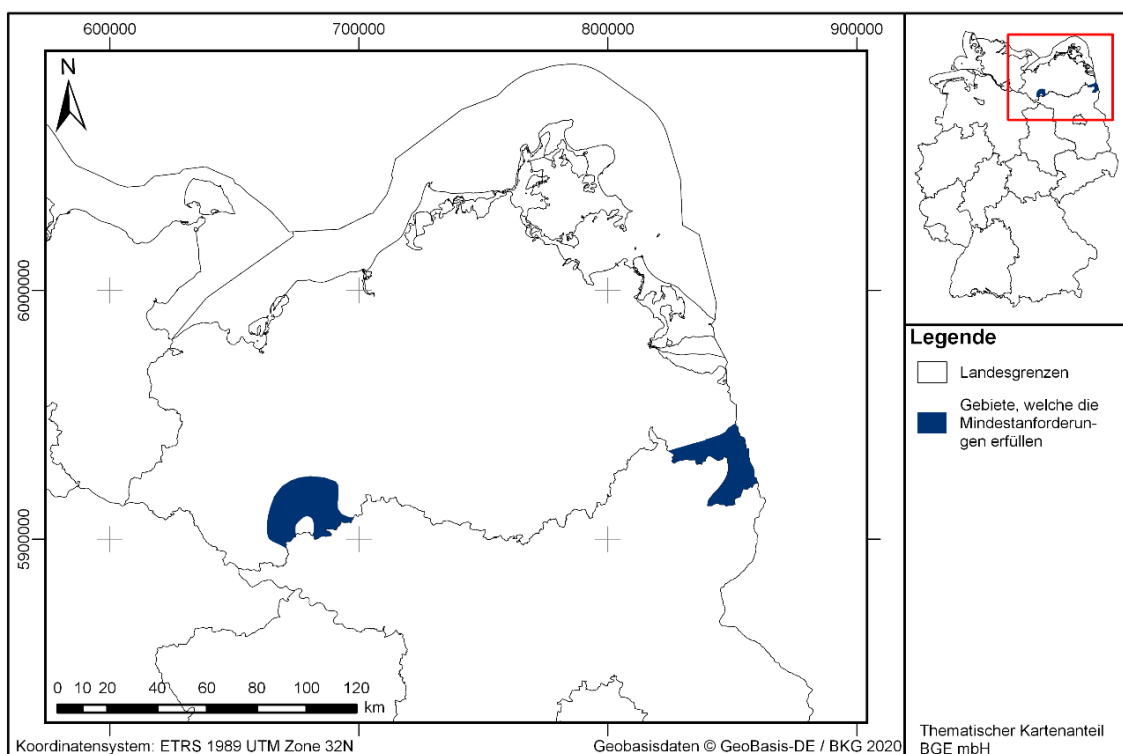


Abbildung 72: *Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Mittleren Jura in Mecklenburg-Vorpommern. Die Landesgrenzen sind in schwarz abgebildet. Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, in blau.*

Eine Auflistung dieser die Mindestanforderungen erfüllenden Gebiete ist in Tabelle 163 zu finden. Abbildung 73 und Abbildung 74 zeigen repräsentative Profilschnitte durch das Deckgebirge der ausgewiesenen Gebiete.

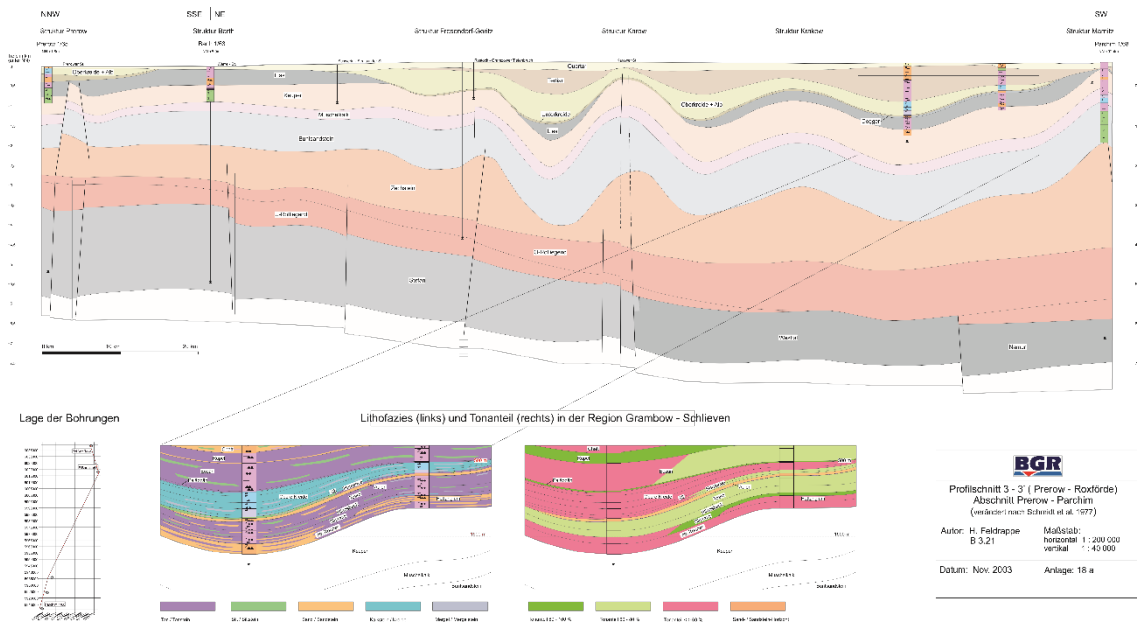


Abbildung 73: Profilschnitt von der Struktur Prerow zur Struktur Marnitz (Feldrappe 2003).
 Der Bereich in der Umgebung der Struktur Marnitz deckt das südwestliche ausgewiesene Gebiet in Mecklenburg-Vorpommern ab.

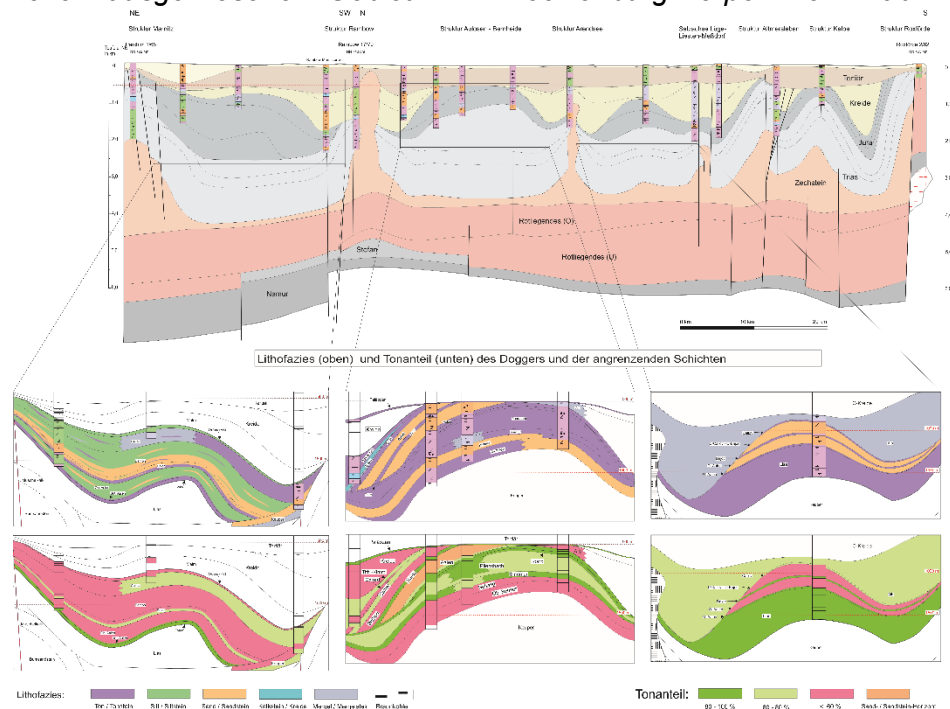


Abbildung 74: Profilschnitt von der Struktur Marnitz zur Struktur Roxförde (Feldrappe 2003).
 Der Abschnitt Marnitz-Rambow deckt das südwestliche ausgewiesene Gebiet in Mecklenburg-Vorpommern ab.

Tabelle 163: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche)

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Dogger_MV_1	627
MG_t_Dogger_MV_2	463

Entscheidungserhebliche Daten

In der nachfolgenden Tabelle 164 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 164: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei-Gruppe-ID	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11884574	8906	2385810	Norddeutschland_Ost	Schichtenverzeichnisse Penkun 1 h2/71, Grabow 1/56 und Karstädt Nord 2/57	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
11888776	9164	2454084	LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06	Schichtenverzeichnisse E Grabow 2/1957, E Karstädt Nord 3/1958, E Karstädt Nord 8/1958 und Gt Neustadt – Glewe 2/1989	Schichtenverzeichnisse Bohrdatenbank Mecklenburg-Vorpommern
11844870	6819		Salzstrukturen_Inspeev1_poly.shp	Umriss des Salzstocks Werle	Umriss der Salzstrukturen in Norddeutschland (von Goerne et al. 2016)
11897915	9560	2493820	Anlage-10_ob.tif	Grenze der lithofazialen Verbreitung des Bathonium in Mecklenburg-Vorpommern	Lithofazies des Bathonium in Nordost-Deutschland (Feldrappe 2003)
11897915	9560	2493821	Anlage-11_ob.tif	Grenze der lithofazialen Verbreitung des Callovium in Mecklenburg-Vorpommern	Lithofazies des Callovium in Nordost-Deutschland (Feldrappe 2003)

Entscheidungserhebliche Daten aus Eigenrecherche:

Kölbel (1972): Dogger: Bathon. 1:500.000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut.
Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura

- Verbreitungsgrenze von Ablagerungen im Bathonium mit Angaben zur Lithologie

Kölbel (1972c): Dogger: Callov. 1:500.000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut.
Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura.

- Verbreitungsgrenze von Ablagerungen im Callovium mit Angaben zur Lithologie

1.3.19 Mittlerer Jura – Sachsen-Anhalt

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura (Dogger), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongesteine enthält, die die Aufgaben des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) erfüllen können (vgl. Kapitel 5.1). Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet Sachsen-Anhalt.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Sachsen-Anhalt, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie: Jura, Mittlerer Jura (Dogger)

Der Mittlere Jura, der mit der informellen Bezeichnung Dogger in Norddeutschland vertreten ist (Mönnig et al. 2018), kann in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Alle Stufen sind in Sachsen-Anhalt stellenweise unter Überdeckung von jüngeren Ablagerungen verbreitet. Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit an das Gestein bestehenden Eigenschaften kommen in Sachsen-Anhalt für die Anwendung der Mindestanforderungen die Tongesteine (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) des Aalenium und Bajocium in Betracht. Da das für die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG verwendete 3D-Modell (vgl. Abschnitt „Bearbeitung im 3D-Modell“) die Stufen der gesamten stratigraphischen Einheit des Mittleren Jura zusammenfasst, wird die Prüfung der Mindestanforderungen für den gesamten Mittleren Jura vorgenommen.

Eine tabellarische Übersicht über die Stufen des Mittleren Jura und deren lithologische Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Sachsen-Anhalt (vgl. Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Region Altmark und nach Südosten angrenzende Gemeinden sowie lokal in der westlichen Altmark und im Osten des Landes (Beutler & Mönnig 2008; Doornenbal & Stevenson 2010).

Eine flächendeckende Verbreitung des Mittleren Jura in Sachsen-Anhalt beschränkt sich auf den Nordosten in der Region Altmark und den nach Südosten angrenzenden Gemeinden. Dort fehlt der Mittlere Jura lediglich im Bereich von Salzstrukturen und deren direkter Umgebung. Im restlichen Sachsen-Anhalt gibt es lediglich lokal begrenzte Vorkommen in der westlichen Altmark und im Osten von Sachsen-Anhalt in Teilen der Gemeinden Zerbst, Coswig und Wittenberg.

Fazies/Ablagerungsraum

Während des Mittleren Jura veränderte sich die paläogeographische Situation, als sich Gondwana von Laurasien endgültig abtrennte und sich der Zentralatlantik und der Peninische Ozean öffneten. Das Nordmeer drang nach Mitteleuropa vor, im Süden bestand eine Verbindung zur Neotethys. Des Weiteren waren das Norddeutsche und das Süddeutsche Becken im Mittleren Jura über die Hessische Senke miteinander verbunden (Mönnig et al. 2018).

Das Mitteleuropäische Becken gliederte sich auf, sodass sich zunehmend Senkungsstrukturen in Nordwest-Südost-Richtung bildeten (Meschede 2018; Beutler & Mönnig 2008). Mitteleuropa war von einem flachen Epikontinentalmeer überflutet, das zur Ablagerung von mächtigen Tonabfolgen führte. Marine Einflüsse kamen neben den westlichen Richtungen auch aus dem Nordosten (z. B. Zentrum der Dänisch-Polnischen Senke; Petzka et al. 2004).

Ab dem Ober-Aalenium und Bajocium erfolgten häufige lithofazielle Wechsel von fluviatildeltaischen Sandsteinen und mächtigen marinen Ton- und Siltsteinen mit Einschaltungen von Toneisensteinlagen. Die Schüttungsrichtung änderte sich von Ost zu Nord (z. B. Ringkobing-Fyn-Hoch, Nordwestmecklenburg-Schwelle) (Mönnig 2008; Petzka et al. 2004). Im Bathonium kam es verstärkt zu Sandschüttungen von Fein- bis Mittelsandsteinen sowie Ablagerungen von Kalk- bis Kalksandsteinen („Cornbrash“; Schudack & Tessin 2015). Ab dem Callovium dominierten wiederum tonige Ablagerungen (Ornatenton-Formation).

Lithologie

Aalenium (Beutler & Mönnig 2008): Die Opalinuston-Formation, die den basalen Teil des Aalenium einnimmt, ist eine monotone Folge von grünlich-schwarzen Tonsteinen, die von den dunklen Tonsteinen des oberen Aalenium durch eine Einschaltung des Altmark-Sandstein getrennt ist.

Bajocium (Mönnig 2015a, 2015b, 2015c, 2015d): Das Bajocium kann in verschiedene tonige Einheiten untergliedert werden:

Sonninienton: Dunkelgraue bis schwarzgraue, z. T. schwach sandige Tonsteine mit etwas heller gefärbten Tonmergelsteinen; der Sandanteil ist auf Schichtflächen in dünnen Lagen erkennbar; immer viel Glimmer).

Coronatenton: Unten dunkel- bis schwarzgraue, weiter oben auch braungraue, schwach sandige Tonsteine im Wechsel mit sandigen Mergeltonsteinen, mit zahlreichen Lagen von Toneisenstein- und Karbonat-Konkretionen, in denen massenhaft Muscheln, Ammoniten oder Belemniten vorkommen.

Garantiantenton: Dunkelgraue oder dunkelbraungraue Tonsteine mit relativ wenigen Kalk- oder Toneisensteingeoden.

Parkinsonienton: Ton- und Tonmergelsteine, bankig, innerhalb der Bänke nach oben zunehmender Anteil an Feinsand; dunkelgrau, glimmerführend, schillreich, pyritisch, oft biturbates Gefüge; im mittleren Teil der Formation auch 20 m feinblättrige Tonsteine, im oberen Teil auch unreine Feinsandsteine; typisch sind Lagen aus rotbraunen, faust- bis kopfgroßen Toneisensteingeoden im Abstand von 40 cm – 200 cm.

Bathonium (Beutler & Mönnig 2008): Gesteine des Bathonium werden von dem mächtigen Württembergica-Sandstein dominiert, welcher von Tonstein und Sandstein überlagert wird.

Callovium (Beutler & Mönnig 2008): Die Abfolge des Callovium ist in Sachsen-Anhalt geprägt von einer geringmächtigen Einheit des Macrocephalen-Tonstein. Der Ornatenton des oberen Callovium ist aufgebaut aus marinem Ton- und Siltstein und wird von Mergelsteinen mit mehreren Lagen Eisenerz überlagert.

Mächtigkeit (Beutler & Mönnig 2008)

Im Aalenium sind tondominierte Abfolgen mit einer Mächtigkeit von maximal 70 m (Opalinuston-Formation) ausgewiesen. Die dunklen Tonsteine des oberen Aalenium haben eine Mächtigkeit zwischen 20 m und 25 m. Die überlagernden Tonsteine des Bajocium erreichen eine Mächtigkeit zwischen 85 und 102 m.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden. Diese sind in Tabelle 165 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 165: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG25)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BGE	11902999/9870	ts/pl	ST_SKUA_Export	SPBA-3D für Sachsen-Anhalt (Doornenbal & Stevenson 2010)
3	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_t0110	Digitales Geländemodell
4	DE	BGR	11844870_01/6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
5	DE	BGR	11897915/9559	pdf	Tongesteine als Barriere_jm_NE-D	Zwischenbericht zur Tonstudie (Feldrappe 2003)
6	DE	BGR	11884574/8906	mdb	Norddeutschland_Ost	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
7	ST	LAGB	11884687/8927	xlsx	ST_11884687_8927	Schichtenverzeichnisse Bohrdatenbank Sachsen-Anhalt

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den bereitgestellten Geodaten wurden folgende thematische Karten verwendet:

Beutler & Mönning (2008): Jura. In: Gerhard H., Bachmann, G., Ehling B.-C., Eichner, R., Schwab, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt, S. 236 ff.

- Abb. 4.10 - 4: Verbreitung und Mächtigkeit des Dogger

Kölbel (1972a): Dogger: Aalen. 1:500.000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura.

- Verbreitung von Ablagerungen im Aalenium mit Angaben zur Lithologie

Kölbel (1972b): Dogger: Bajoc. 1:500.000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura.

- Verbreitung von Ablagerungen im Bajocium mit Angaben zur Lithologie

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Mittleren Jura in Sachsen-Anhalt geprüft wurde, ist in Tabelle 166 aufgeführt. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse im Folgenden erläutert.

Tabelle 166: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Dogger aus der Basisfläche Dogger (aus allen Kacheln)	b_Dogger_ST.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Dogger_ST_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	b_Dogger_ST_MACRORESULT_AK.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Dogger_ST_MACRORESULT_qs.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_jm_ST.dxf MG_t_jm_ST.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 06_Dogger_Nord
a) Import der Fläche aus 2i) als DXF in ArcGIS Pro	
b) Digitalisierung und Vektorisierung des Verbreitungsgebietes des Dogger in Abb. 4 10-4 aus (Beutler & Mönning 2008) in ArcGIS Pro	Verbreitung_Dogger_ST_Bachmann_2008.shp
c) Zusammenführen der Flächen aus 2i) und 3b) und Erzeugung einer shape-Datei	MA_Gebiet_ST_Merge_SPBA.shp
d) Erweiterung der Fläche aus 3c) mit Hilfe der georeferenzierten lithologisch-paläogeographischen Karten aus Kölbl (1972a) und Kölbl (1972b) zum Aalenium und Bajocium (Verbreitungsgrenzen)	
e) Separieren der Fläche in Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Trennen“	MA_Gebiet_ST_Dogger_final.shp
f) Entfernen aller Flächen mit einer Fläche kleiner als 10 km ² und Benennung der Gebiete	MA_Gebiet_ST_Dogger_final_Kopie.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 166 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete 3D-Modell für Sachsen-Anhalt wurde auf Basis des 2D-Kartenwerkes des Southern Permian Basin Atlas (SPBA) erstellt (Doornenbal & Stevenson 2010). Auf Basis von Isolinen wurden Hilfsflächen modelliert, deren Verschneidungen und Durchdringungen entfernt wurden. Aus diesen Hilfsflächen wurden elf Basisflächen modelliert.

- Tertiär (ST_131_t_iso_rev01)
- Oberkreide (ST_140_kro_iso_rev01)
- Unterkreide (ST_150_kru_iso_rev01)
- Oberjura (ST_160_jo_iso_rev01)

- Mitteljura (ST_170_jm_iso_rev01)
- Unterjura (ST_180_ju_iso_rev01)
- Keuper (ST_190_k_iso_rev01)
- Oberer Buntsandstein (ST_201_so_iso_rev01)
- Unterer Buntsandstein (ST_210_su_iso_rev01)
- Zechstein (ST_220_z_iso_rev01)
- Rotliegendesedimente (ST_240_ro_iso_rev01)

Störungen sind im Datensatz des SPBA als Linien ohne Teufenangaben ausgewiesen. Im SPBA-3D wurden diese Störungslinien auf die modellierten Flächen projiziert, ohne die Basisflächen zu versetzen.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 166 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Dogger wurde aus dem 3D- Modell die Basisfläche Mitteljura (ST_170_jm_iso_rev01) verwendet (Tabelle 166, 2b).

Das digitale Geländemodell für Sachsen-Anhalt wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 166, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 166, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 166, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Dogger und der Topfläche berechnet (Tabelle 166, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Malm, der Unter- sowie Oberkreide und des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 166, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500 m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht.

Falls im Bearbeitungsgebiet aktive Störungszonen vorlagen, wurde für diese ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert (vgl. BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde (Tabelle 166, 2g). Der

Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage m u. GOK“ überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert (Tabelle 166, 2h). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, wurden gelöscht.

Die Bearbeitungsfläche Dogger wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften im Custom ASCII-Format weiterverwendet (Tabelle 166, 2i).

2D-Bearbeitung

Abweichend vom sonst üblichen Verfahren (vgl. BGE 2020j) wurde mithilfe der in den Eingangsdaten aufgelisteten Karten bei der Prüfung der Mindestanforderungen die Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, erweitert. Dies liegt in der Qualität des genutzten 3D-Modells des SPBA begründet. Das 3D-Modell des SPBA ist ein Modell, das auf Isolinien basiert. Es ist kein Strukturmodell und wurde nicht vom Landesamt von Sachsen-Anhalt herausgegeben. Einzelne Bohrungen belegen die generelle Erfüllung der Mindestanforderungen für die gesamte Fläche.

Kartenmaterial

Zur Ausweisung von Gebieten, die die Mindestanforderungen im Tongestein des Dogger in Sachsen-Anhalt erfüllen, wurden ausgewählte Verbreitungskarten georeferenziert und vektorisiert. Die verwendeten Karten sind in den Eingangsdaten aufgelistet.

Die Basisfläche der Verbreitung des Dogger aus dem SPBA (Tabelle 166, 2i) wurde mit Hilfe der in Schritt 3b (Tabelle 166) vektorisierten thematischen Karte aus Beutler & Mönning (2008) und den georeferenzierten Verbreitungsgrenzen aus Kölbel (1972a) und Kölbel (1972b) erweitert (Werkzeug „Feature erstellen“ sowie „Feature ändern“) (Tabelle 166, 3d). Die dadurch erhaltene Fläche liegt als ein Polygon vor. Diese Fläche wurde mit Hilfe des Werkzeugs „Trennen“ in ArcGIS Pro in einzelne Flächen separiert (Tabelle 166, 3e), sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ geprüft werden kann. Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt (Tabelle 166, 3f).

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bildet das Kapitel „Jura“ der „Geologie von Sachsen-Anhalt“ zur Verbreitung des Dogger in Sachsen-Anhalt (Beutler & Mönning 2008). Unterstützend findet die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), dessen Zwischenbericht von 2003 (Feldrappe 2003) sowie die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2013) Anwendung.

Diese Studien wurden zur weiteren Beurteilung (Plausibilitätsprüfung) der mit dem verwendeten Kartenmaterial erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse (siehe Tabelle 165 und Tabelle 152) wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Mittleren Jura geprüft.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die lithologische Bewertung der Gesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt ist.

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Aalenium und Bajocium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Landesgrenzen von Sachsen-Anhalt geprüft. Die mittels sieben Bohrungen erschlossenen Gesteinsabfolgen erfüllen dabei die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in der auf Grundlage des Kartenmaterials ausgewiesenen Fläche. Es handelt sich hier um die Bohrungen Waddekath 25/25a/60, Waddekath 39/68, Waddekath 17/59, Nettgau 5/59, Altmark 101/61, Mahlpfuhl 105/63 und Schwiesau 1/87 in den stratigraphischen Einheiten Aalenium und Bajocium mit einem Tonanteil zwischen 60 und teilweise mehr als 80 % und einer kumulativen Mächtigkeit zwischen 115 m und 250 m.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung i.d.R. geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit konnten Hoth et al. (2007) bestätigen. Lithotypen, deren Tonanteile größer als 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die diese Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Jedoch weisen Hoth et al. (2007) darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Bohrungen, die hinsichtlich ihres Tonanteils im Rahmen der Tonstudie von Hoth

et al. (2007) ausgewertet wurden, wurden im Weiteren für die zugrundeliegende Bewertung in Frage kommender Gesteinsabfolgen für die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG (insbesondere § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG) verwendet. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse, zeigen Bereiche in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit, teilweise oder nicht erfüllt ist.

Wie aus der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) zu entnehmen ist, sind die Tongesteinsformationen des Mittleren Jura teilweise sehr inhomogen aufgebaut. Neben Ton- und Tonmergelstein, die dominant vorliegen, enthalten die Formationen Einschaltungen von z. B. Mergel(ton)stein oder unreinen Sandsteinen. Mit Hilfe der Lithologisch-paläogeographischen Karten der DDR (Kölbel 1972a; Kölbel 1972b) sowie Fazieskarten aus Feldrappe (2003) konnten tonige Faziesbereiche im Norden und Westen von Sachsen-Anhalt identifiziert werden.

Unter Verweis auf die Schlussfolgerungen von Hoth et al. (2007) zum Tonanteil und den in den einzelnen für das ausgewiesene Gebiet betrachteten Bohrungen der Tonstudie (Waddekath 25/25a/60, Waddekath 39/68, Waddekath 17/59, Nettgau 5/59, Altmark 101/61, Mahlpfuhl 105/63 und Schwiesau 1/87) ermittelten Tonanteilen für die Einheiten Aalenium und Bajocium kann die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit als mindestens teilweise erfüllt angesehen werden.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein im Mittleren Jura in den verbleibenden Gebieten in Sachsen-Anhalt **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Mittleren Jura wurde zwischen Top und Basis des Mittleren Jura im 3D-Raum berechnet.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten Periode des Mittleren Jura zusammen. Allerdings weisen lediglich die Stufen des Aalenium und des Bajocium Gesteinsabfolgen in Form von Tongesteinen auf, die für die Ausweisung eines ewGs in Betracht kommen. Es ist daher anzunehmen, dass nur in Teilen des durch die zuvor beschriebene Bearbeitung ausgewiesenen Gebiets eine Mächtigkeit des Tongesteins von 100 m erreicht wird. Dennoch werden für die angegebenen Stufen in den betrachteten Gebieten (kumulative) Mächtigkeiten von zum Teil deutlich mehr als 100 m beschrieben (siehe Geologischer Überblick). Zum jetzigen Zeitpunkt kann jedoch keine weitere Eingrenzung vorgenommen werden.

Des Weiteren wurden Bohrdaten der Tonstudie sowie thematische Karten zum Aalenium und Bajocium (Hoth et al. 2007; Kölbel 1972a; Kölbel 1972b) hinsichtlich der Mächtigkeiten von mehr als 100 m geprüft. Da die thematischen Karten (Kölbel 1972a; Kölbel 1972b) sowie sieben Bohrungen in den ausgewiesenen Flächen in Sachsen-Anhalt im Aalenium und Bajocium (kumulative) Mächtigkeiten von mehr als 100 m zeigen, wird die

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ zunächst als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Fläche des Mittleren Jura wurde anhand der Top- und Basisfläche des Mittleren Jura des SPBA im 3D-Raum unter Einbeziehung des dynamischen digitalen Geländemodells (dynDGM) geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Des Weiteren wurden Bohrdaten der Tonstudie hinsichtlich der Tiefenlage der Tongesteinsformationen/Tonsteinabfolgen im Aalenium und Bajocium überprüft. Einige wenige Bohrungen im Westen des ausgewiesenen Gebietes, die im Rahmen der Erstellung der Tonstudie ausgewertet wurden (Feldrappe 2003), weisen auf Tiefenlagen der Basis des Mittleren Jura unter 1500 m u. GOK hin. Jedoch liegt zum jetzigen Zeitpunkt kein ausreichendes räumliches Verständnis des Ablagerungsraumes vor, sodass eine Eingrenzung des ausgewiesenen Gebietes nicht möglich ist.

Sieben Bohrungen in den ausgewiesenen Flächen in Sachsen-Anhalt im Aalenium und Bajocium zeigen Tiefenlagen zwischen 300 m und 1500 m. Daher wird für die verbleibenden Gebiete die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als zunächst **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg in angrenzenden Bundesländern fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Sachsen-Anhalt können Gebiete ausgewiesen werden, in denen Tongesteinsformationen des Mittleren Jura alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 75).

Ergebnis

In Abbildung 75 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Mittlerer Jura in Sachsen-Anhalt dargestellt. Eine Auflistung dieser die Mindestanforderungen erfüllenden Gebiete ist in Tabelle 167 zu finden. Abbildung 76 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge der ausgewiesenen Gebiete.

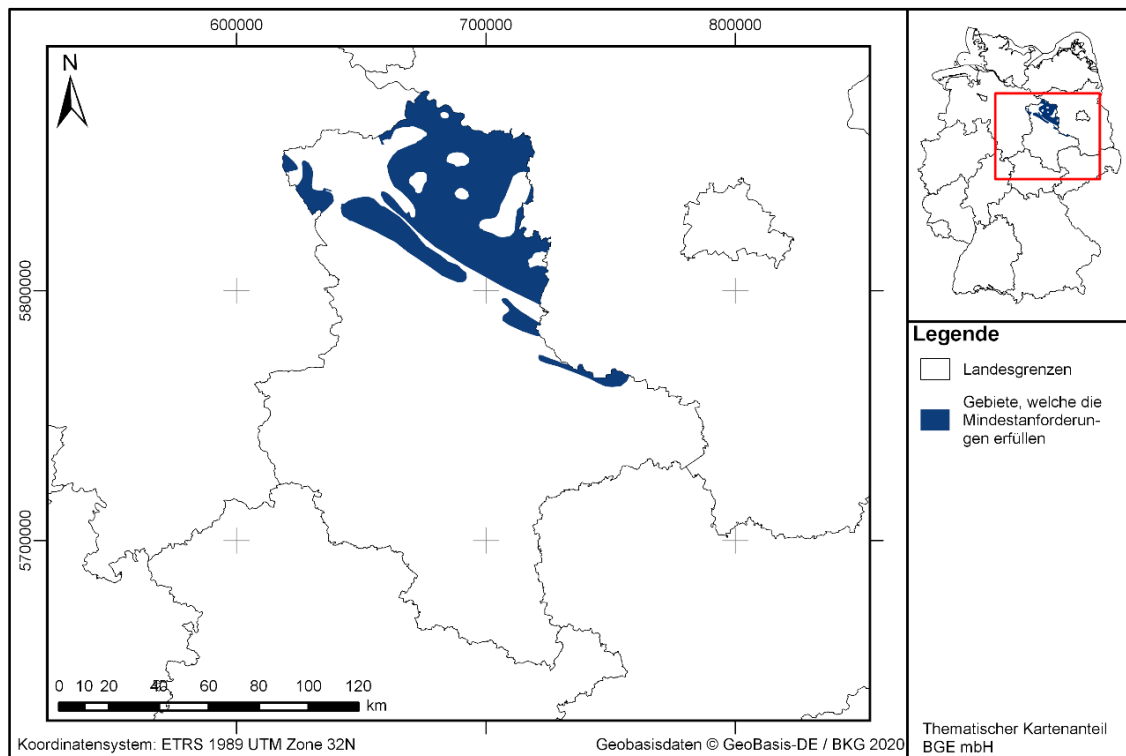


Abbildung 75: *Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein des Mittleren Jura in Sachsen-Anhalt. Die Landesgrenzen sind in schwarz abgebildet. Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, in blau.*

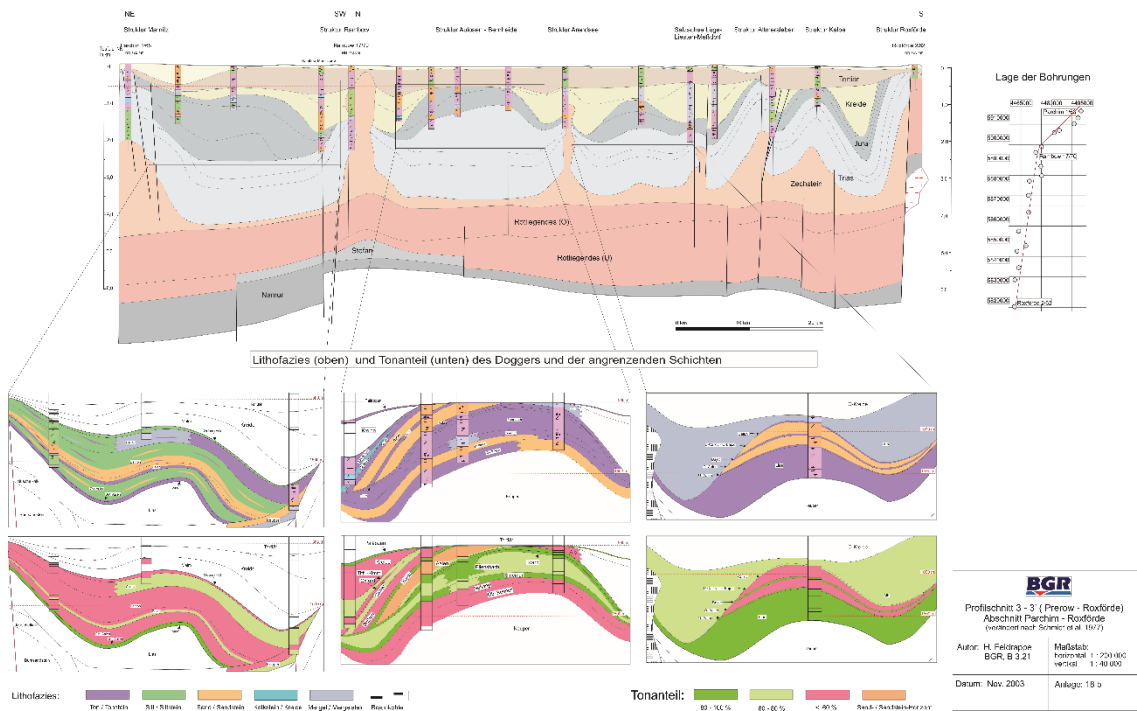


Abbildung 76: Profilschnitt von der Struktur Marnitz bis Roxförde mit Lage der Bohrungen (Feldrappe 2003).
 Der Abschnitt Rambow bis Roxförde bildet das Deckgebirge in Sachsen-Anhalt ab. Tabelle 167: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen und Fläche).

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Dogger_ST_1	2779
MG_t_Dogger_ST_2	465
MG_t_Dogger_ST_3	147
MG_t_Dogger_ST_4	113
MG_t_Dogger_ST_5	105
MG_t_Dogger_ST_6	28
MG_t_Dogger_ST_7	12

Entscheidungserhebliche Daten

In folgender Tabelle 168 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweitung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 168: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei-Gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11902999	9870	250 510 0	ST_SKUA_Export	ST_Horizons_2020_06_09.ts	SPBA-3D für Sachsen-Anhalt
11884574	8906	238 581 0	Norddeutschland_Ost	Schichtenverzeichnisse Waddekath 25/25a/60, Waddekath 39/68, Waddekath 17/59, Nettgau 5/59, Altmark 101/61, Mahlpfuhl 105/63 und Schwiesau 1/87	Bohrdatenbank Tonstudie

Entscheidungserhebliche Daten aus Eigenrecherche:

Beutler & Mönning (2008): Jura. In: Gerhard H., Bachmann, G., Ehling B.-C., Eichner, R., Schwab, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt, S. 236 ff.

- Abb. 4.10-4: Verbreitung und Mächtigkeit des Dogger

Kölbel (1972a): Dogger: Aalen. 1:500.000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura.

- Verbreitung von Ablagerungen im Aalenium mit Angaben zur Lithologie

Kölbel (1972b): Dogger: Bajoc. 1:500.000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura.

- Verbreitung von Ablagerungen im Bajocium mit Angaben zur Lithologie

1.3.20 Mittlerer Jura, Opalinuston-Fm. – Bayern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23°StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura (Braunjura, Opalinuston-Formation), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Bayern (BY). Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommt für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.2 in BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Jura die Opalinuston-Formation an der Basis des Mittleren Jura (Dogger α) in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Bayern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Mittlerer Jura (Braunjura-Gruppe), Opalinuston-Formation

Der Mittlere Jura, der in Süddeutschland auch unter der Bezeichnung „Braunjura-Gruppe“ bekannt ist (Mönnig et al. 2018), kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Alle Stufen sind in Bayern vorhanden. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) wird in Bayern die Opalinuston-Formation (Dogger α) in der Stufe des Aalenium betrachtet. Grundlage der Bearbeitung ist die im 3D-Modell ausgewiesene Bearbeitungsfläche Braunjura. Die Verbreitung der Opalinuston-Formation ist durch Bohrungsdaten und paläogeographische Karten weiter eingegrenzt.

Eine Zusammenstellung über die stratigraphischen Einheiten des Mittleren Jura und dessen lithologischer Ausprägung kann man der tabellarischen Übersicht von Bayern entnehmen (vgl. Kapitel 5.1 BGE 2020l).

Geographische Verbreitung

Der Mittlere Jura ist im Gebiet von Bayern im Untergrund in großen Teilen verbreitet. Er fehlt aber südöstlich einer gedachten Linie Peißenberg – München – Landshut – Straubing, in dem Teil, der durch die Vindelizische Schwelle und das Grundgebirge des Böhmisches Festlandes repräsentiert wird. Südlich der Donau taucht der gesamte Jura unter die Ablagerungen von Kreide und Tertiär ab und ist nur aus Tiefbohrungen bekannt (Abbildung 78). Am Alpenrand bei Miesbach (zwischen Bad Tölz und Rosenheim) liegt die Hangendgrenze des Jura bereits bei 5000 m u. NN (Meyer & Schmidt-Kaler 1996).

Fazies/Ablagerungsraum

Das süddeutsche Jurameer war Teil eines Epikontinentalmeeres, das weite Teile Europas bedeckte. Die Wassertiefen des flachen Nebenmeeres, das sich bis zum ozeanischen Golf der Tethys im Südosten erstreckte, lagen meist zwischen 20 m und 150 m (Geyer et al. 2011). An der Basis des Mittleren Jura (Aalenium) fanden starke weiträumige Senkungsereignisse im Süden Deutschlands statt und führten zur Ablagerung von der über 100 m mächtigen Opalinuston-Formation, die ohne scharfe Grenze aus den fossilreichen Jurensismergeln des Unteren Jura, mit denen das Schwarzjura-Meer seine größte Ausdehnung erreichte, hervorgeht (Meyer & Schmidt-Kaler 1996). Der Opalinuston zeichnet sich sowohl im Verbreitungsgebiet der Nordschweiz als auch im angrenzenden Gebiet von Baden-Württemberg durch eine geringe laterale Variabilität der Fazies und eine relativ einheitliche Lithologie aus (Allia 1996; NAGRA 2002). Es wird angenommen, dass dies im Großen und Ganzen auch auf Bayern zutrifft.

Lithologie

Die Opalinuston-Formation besteht aus Tonsteinen und Tonmergelsteinen und weist im höheren Abschnitt regional Sandsteineinschaltungen auf. Im unteren Braunjura setzten sich die Bildungsbedingungen der Schwarzjura-Zeit zunächst fort. In einem ständig absinkenden Stillwasserbecken wurden bis 100 m mächtige, pyritreiche, organismenarme Tone abgesetzt, die heute als Opalinuston bezeichnet werden (Meyer & Schmidt-Kaler 1996). Die Opalinuston-Formation im süddeutschen Raum besteht überwiegend aus leicht schluffigen Tonsteinen. Die dunkelgraue bis schwarze Farbe ist auf feinverteilten Pyrit und geringe Mengen (größer 3 %) organisches Material zurückzuführen (Geyer et al. 2011; Hoth et al. 2007). Die Tonsteine sind wenig gegliedert, jedoch unterscheiden sich die Abschnitte der Formation im Feinsandanteil oder im Kalkgehalt. Die Schluff- bzw. Feinsandlinsen können bis zu 20 cm mächtig sein und sind teilweise auch kalkig zementiert. Des Weiteren treten Einschaltungen von knolligen Hartgründen, Siderit- und Kalkkonkretionen und Pyrit in Form von Konkretionen auf (Amelung et al. 2007). Im obersten Abschnitt schalten sich in zunehmend sandige und mergelige Gesteine (Wasserfallschichten) in die Abfolge ein. Darüber folgt ein sandarmer Tonstein-Horizont, in den sich nach oben hin wieder vermehrt kalkige Feinsandstein-Linsen und Platten einschalten. Diese Schichten sind nach der auffälligen Weidespur (*Gyrochorte*) Zopfplattenschichten benannt. Die Zopfplattenschichten sind wie die Wasserfallschichten noch

dem Dogger α zuzuordnen, die Grenze zum Dogger β wird heute an die Basis der Comptumbänke gelegt (Geyer et al. 2011).

Die Hauptgemengteile der Opalinuston- Formation sind Illit, Kaolinit und Chlorit, die Nebengemengteile Quarz sowie ein quellfähiges Illit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineral (Henke & Hiller 1985; Merklein-Lempp 1985). Die genaue Tonmineralzusammensetzung wird in der Literatur allerdings sehr unterschiedlich angegeben, wie die folgenden Variationsbreiten zeigen: 18 % – 36 % Illit, 6 % – 12 % Chlorit, 10 % – 20 % Kaolinit und 6 % – 12 % Illit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineral (Schmidt 1996).

Mächtigkeit

Generelle Mächtigkeiten für die Opalinuston-Formation werden von (Franz et al. 2013) für Baden-Württemberg mit 110 m – 150 m, für Bayern mit 30 m – 100 m und für Norddeutschland mit 20 m angegeben. Meyer & Schmidt-Kaler (1996) zufolge erreicht die Opalinuston-Formation in Bayern im Raum Neu-Ulm ihre größte Mächtigkeit mit Maximalwerten von ungefähr 100 m. Die Formation verringert in Bayern ihre Mächtigkeit in Richtung Südosten kontinuierlich, um entlang einer Linie München – Straubing, wo die Vindelizische Schwelle (Vindelizisch-Böhmisches Land) erreicht wird, gänzlich zu verschwinden (Franz et al. 2013; Meyer & Schmidt-Kaler 1996).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 169). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 169: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datengruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	BY	LfU	11877029/9006	ts	GeoMol FWM	Übersichtsmodell GeoMol FWM (GeoMol Team 2015)
3	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
4	DE	BGR	11844870_01/6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
5	BY	LfU	11873385/7698	accdb	Bohrungen	Bohrdatenbank Bayerns
6	DE	BGE	11888166/9093	xlsx	BY_Opalinuston	Aufbereitung der Schichtenverzeichnisse Bayerns
7	DE	BGR	11897915/9559	pdf	Regionale Tonstudie	Zwischenbericht zur Tonstudie (Krull et al. 2004)
8	BY	LfU	11842369_01/7862	pdf	\\Geolog_Karten_Teil1\Erläuterungen\Erl_GK500	Erläuterungen zur Geologischen Karte, Abb: 3.3-7 Mächtigkeit des Opalinustons (Dogger Alpha) und seine vermutliche Südostgrenze gegen das Vindelizische Land (Meyer & Schmidt-Kaler 1996)
9	DE	BGR	11884574/8906	mdb	Sueddeutschland_2000	Bohrdatenbank der Tonstudie für Süddeutschland

Eigenrecherche

Es wurden keine weiteren Daten verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23°StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Mittleren Jura in Baden-Württemberg geprüft wurde, ist in Tabelle 170 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 170: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Braunjura aus der Topfläche Rhaetium–Unterjura	b_Braunjura_BY.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Braunjura_BY_MACRORESULT.ts
g) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	b_Braunjura_BY_MACRORESULT_AK.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Braunjura_BY_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_jm_BY.dxf MG_t_jm_BY.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Import der Bearbeitungsfläche aus 2i) als Polygondatensatz aus DXF-Datei in ArcGIS Pro sowie die txt-Datei als XY-Datensatz	
b) Fläche ohne z-Wert speichern und Polygone zusammenführen (Werkzeug „Zusammenführen (Dissolve)“)	MG_t_jm_BY_Copy_Diss.shp
c) Vektorisierung der Mächtigkeitkarte des Opalinuston (Dogger α) in Abb.3.3-7 aus Meyer & Schmidt-Kaler (1996) in ArcGIS Pro	GK500_100m_Maechtigkeit_Opalinuston.shp

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Zusammenführen der Flächen aus 2i) und 3b). Erweitern der Bearbeitungsfläche nach Norden und Beschneiden mit 3b) und Landesgrenze (VG250)	MG_t_jm_BY_clip.shp
e) Flächenbedarf prüfen	MG_t_jm_BY_clip_area.shp
f) Qualifizieren der Bearbeitungsfläche mit Bohrungsdaten	BY_Bohrungen_Tonstudie_relevant.shp BY_Bohrungen_bOT_relevant.shp
g) Erzeugung einer Shape-Datei	MA_Gebiet_BY_jm.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 170 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell ist das GeoMol Übersichtsmodell FWM (framework model) des bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) (GeoMol Team 2015). Das GeoMol-FWM-Modell wurde im Zuge eines grenzüberschreitenden EU-Projektes erstellt und beinhaltet neun stratigraphische Einheiten (von Top Grundgebirge bis Basis Obere Meeresmolasse) sowie eine Topographiefläche. Das Modell betrachtet den Bereich des bayerischen Molassebeckens bis etwa dem Beginn der Fränkischen Alb. Folgende Flächen wurden modelliert; ob als Basis- oder Topfläche ist dem Präfix B_ bzw. T_ zu entnehmen:

- B_Q = Basis Quartär
- B_OSM = Basis Ob. Süßwassermolasse
- B_OMM = Basis Ob. Meeresmolasse
- B_OMME = Basis Ältere Ob. Meeresmolasse
- B_UMJ = Basis Jüngere Unt. Meeresmolasse
- B_UMA = Basis Ältere Unt. Meeresmolasse
- B_T = Basis Tertiär
- T_JU = Top Ob. Jura
- T_JM = Top Mittlerer Jura
- T_RJL = Top Rhaetium–Unterjura
- T_Tr = Top Trias
- T_B = Top Grundgebirge (Basement)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 170 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Braunjura wurde aus dem 3D-Modell die Topfläche Rhaetium – Unterjura verwendet (Tabelle 170, 2b) und bildet damit nicht die gesamte Verbreitung des Mittleren Jura in Bayern ab, sondern endet auf Höhe der Städte Ulm – Lauingen (Donau) – Donauwörth – Ingolstadt.

Das digitale Geländemodell für Bayern wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 170, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 170, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 170, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Braunjura und der Topfläche berechnet (Tabelle 170, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Topflächen des Mittleren Jura sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 170, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht.

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen für die ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert wurde (vgl. BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde (Tabelle 170, 2g). Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ in m u. GOK überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert (Tabelle 170, 2h).

Die Bearbeitungsfläche Braunjura wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 170, 2i).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Die aus dem 3D-Modell resultierende Bearbeitungsfläche Braunjura wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der Polygon-Datensatz der DXF-Datei ohne z-Wert gespeichert und in ein Polygon ohne die Vermaschung der 3D-Bearbeitungsfläche zusammgeführt (Werkzeug „Zusammenführen (Dissolve)“, Tabelle 170, 3b). Anschließend wurde die Bearbeitungsfläche Braunjura mit der digitalisierten und vektorisierten 100 m-Mächtigkeitlinie aus (Meyer & Schmidt-Kaler 1996) bearbeitet (Tabelle 170, 3c). Die Bearbeitungsfläche Braunjura wurde nach Norden analog zur 100 m-Mächtigkeitlinie aus (Meyer & Schmidt-Kaler 1996) erweitert (Werkzeug „Feature erstellen“ sowie „Feature ändern“, Tabelle 170, 3d.). Im Osten wurde die Bearbeitungsfläche auf die 100 m-Mächtigkeitlinie aus (Meyer & Schmidt-Kaler 1996) beschnitten (Werkzeug „Ausschneiden“), da die Mächtigkeit der Opalinuston-Formation nach Osten flächenhaft unter 100 m abfällt. Die verbleibende Bearbeitungsfläche wurde mit der bayrischen Landesgrenze (VG250) beschnitten und liegt als ein separates Polygon vor. Die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ wurde geprüft und die Fläche ist größer als 10 km² (Tabelle 170, 3e).

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2013; Krull et al. 2004) herangezogen sowie Bohrdaten der Tonstudie und der intern aufbereiteten Schichtenverzeichnisse der Bohrdatenbank Bayerns (Tabelle 169), um die lithologische Abfolgen des Mittleren Juras zu prüfen (Tabelle 170, 3f).

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bilden die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), deren Zwischenbericht von 2001 (Krull et al. 2004), die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2016) sowie das Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland (Reinhold et al. 2011).

Bohrdaten

Die Bohrdatenbank Bayerns (vgl. Tabelle 169, DokID/Dateigruppe: 11873385/7698) wurde basierend auf der Stratigraphie des Opalinuston (bOT) sowie der hangenden Schicht ausgewertet und als interne Datenlieferung eingeladen (vgl. Tabelle 169, DokID/Dateigruppe: 11888166/9093). Die Mächtigkeit des Opalinuston wurde aus der Differenz der „Bis Teufen“ (*depth to*) berechnet, Bohrungen, deren Endteufen mit der „Bis Teufe“ des Opalinuston zusammenfällt, wurden entfernt und im ArcGIS Pro dargestellt. Die Bohrung TB Donautherne Neu-Ulm (7625BG015001) weist 113 m Mächtigkeit in einer erbohrten Teufe von 531 m – 644 m auf (Franz et al. 2001). Diese Bohrung erfüllt damit die Mächtigkeit- und Teufenkriterien und liegt innerhalb der ausgewiesenen Bearbeitungsfläche. Die übrigen 28 Bohrungen weisen Mächtigkeiten kleiner 100 m auf und liegen allesamt außerhalb der ausgewiesenen Bearbeitungsfläche.

Hinsichtlich des Tonanteils ausgewertete Bohrungen der Studie von Hoth et al. (2007) wurden für die Bewertung von Tongesteinsformationen herangezogen. Dafür wurden die Bohrungen nach stratigraphischen Einheiten und Tonanteil gefiltert und harmonisiert. Kumulative Mächtigkeit und Tonanteils-Klasse zeigen Bereiche, in denen die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt ist. Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten (vgl. Tabelle 169, DokID/Dateigruppe: 11884574/8906) wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Aalenium und Bajocium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK innerhalb der Landesgrenzen von Bayern geprüft. Die Bohrung TB Donautherne Neu-Ulm (LOCID 111) hat im Aalenium feinsandigen Tonstein erbohrt. Die Ergebnisse der Tonstudie basieren auf der petrographischen Ansprache der Bohrungen und bestätigen somit die zuvor ausgeführte, stratigraphische Auswertung für den Opalinuston.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5°StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. In Jahn et al. (2016) sind Durchlässigkeitswerte (k_f -Wert) für den Opalinuston aufgelistet, die durch Packertests in Bohrungen an zwei Lokalitäten (Mont Terri und Bohrung Benken) ermittelt wurden, und alle Werte liegen im Bereich oder unterhalb von 10^{-12} m/s.

Die Opalinuston-Formation an der Basis des Mittleren Jura (Aalenium) ist im Gebiet Bayerns dominant aus pyritreichen und organismenarmen Tonsteinen aufgebaut (Meyer & Schmidt-Kaler 1996). Dies belegt u. a. die Bohrung TB Donautherne Neu-Ulm (7625BG015001, LOCID 111). Daher kann die Annahme getroffen werden, dass die Opalinuston-Formation im Aalenium die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit **erfüllt**.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Mittleren Jura wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Mittleren Jura zusammen.

Als geeignete Tongesteins-Formationen innerhalb des Mittleren Jura wurde der Opalinuston ausgewiesen. Die Verbreitungsfläche des Mittleren Jura wurde mit der 100-m-Mächtigkeitlinie aus Meyer & Schmidt-Kaler (1996) verschnitten. Innerhalb dieser Fläche liegt die Bohrung TB Donautherne Neu-Ulm (7625BG015001), die eine Mächtigkeit des Opalinuston größer 100 m anzeigt. Daher wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ in dem verbleibenden Gebiet als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Mittleren Jura wurde im südlichen Teil anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Bayern können Gebiete ausgewiesen werden, in denen Tongesteinsformationen des Mittleren Jura (Opalinuston-Formation) alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 77).

Ergebnis

In Abbildung 77 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Mittlerer Jura (Opalinuston-Formation) in Bayern dargestellt. Abbildung 78 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge der ausgewiesenen Gebiete.

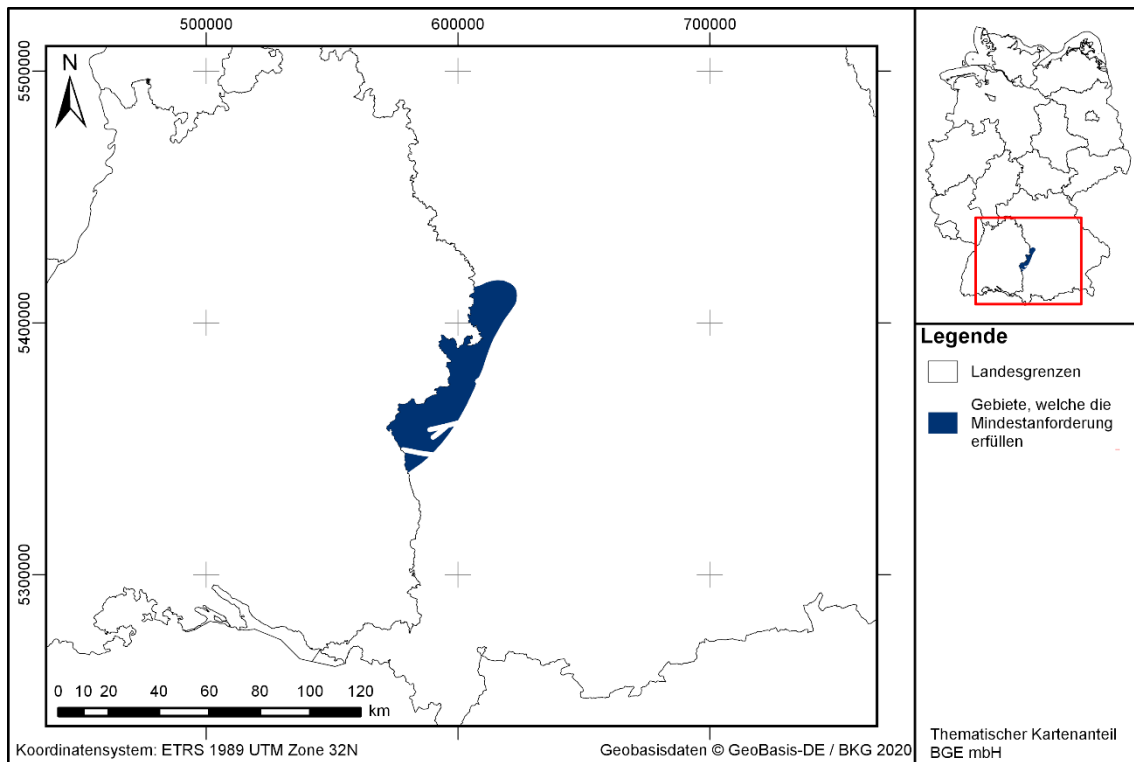


Abbildung 77: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen

Eine Auflistung dieser die Mindestanforderung erfüllenden Gebiete ist in Tabelle 171 zu finden.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 172 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 172: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserheb- liches Datum aus der Datei	Beschreibung
11877029	9006		GeoMol FWM		Übersichtsmodell GeoMol FWM
11842369_01	7862		Meyer&Schmidt-Ka- ler_1996_Mächtigkeit_des_Opalinustons	100m-Mächtigkeitlinie	Mächtigkeitkarte des Opalinuston
11888166	9093	2389902	BY_Opalinuston	7625BG015001	Aufbereitung der Schichtenverzeichnisse Bayerns
11873385	7698	153428	Bohrungen	7625BG015001	Bohrdatenbank Bayerns
11884574	8906	2385812	Sueddeutschland_2000	TB Donautherme Neu-Ulm (LOCID 111)	Bohrdatenbank der Tonstudie für Süddeutschland

1.3.21 Mittlerer Jura, Opalinuston-Fm. – Baden-Württemberg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23°StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura (Braunjura, Opalinuston-Formation), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Baden-Württemberg (BW). Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommt für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.2 BGE 2020j) innerhalb des Mittleren Jura die Opalinuston-Formation an der Basis des Mittleren Jura (Dogger α) in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Baden-Württemberg, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13°StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Mittlerer Jura (Braunjura-Gruppe), Opalinuston-Formation

Der Mittlere Jura, der in Süddeutschland auch unter der Bezeichnung „Braunjura-Gruppe“ bekannt ist (Mönnig et al. 2018), kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) wird in Baden-Württemberg die Opalinuston-Formation (Dogger α) in der Stufe des Aalenium betrachtet. Grundlage der Bearbeitung ist die im 3D-Modell ausgewiesene Bearbeitungsfläche Braunjura. Die Verbreitung der Opalinuston-Formation ist durch Bohrungsdaten und paläogeographische Karten weiter eingegrenzt.

Eine Zusammenstellung über die stratigraphischen Einheiten des Mittleren Jura und dessen lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht von Baden-Württemberg entnommen werden (vgl. Kapitel 5.1 in BGE 2020l).

Geographische Verbreitung

Der Mittlere Jura ist in weiten Teilen von Baden-Württemberg (Schwäbische Alb, Hochrhein, Alpenvorland und Oberrheingraben) flächenhaft im Untergrund verbreitet (Abbildung 80 und Abbildung 81).

Fazies/Ablagerungsraum

Das süddeutsche Jurameer war Teil eines Epikontinentalmeeres, das weite Teile Europas bedeckte. Die Wassertiefen des flachen Nebenmeeres, das sich bis zum ozeanischen Golf der Tethys im Südosten erstreckte, lagen meist zwischen 20 m und 150 m (Geyer et al. 2011). An der Basis des Mittleren Jura (Aalenium) fanden starke weiträumige Senkungsereignisse im Süden Deutschlands statt und führten zur Ablagerung von der über 100 m mächtigen Opalinuston-Formation, die ohne scharfe Grenze aus den fossilreichen Jurensismergeln des Unteren Jura, mit denen das Schwarzjura-Meer seine größte Ausdehnung erreichte, hervorgeht (Meyer & Schmidt-Kaler 1996). Der Opalinuston zeichnet sich sowohl im Verbreitungsgebiet der Nordschweiz als auch im angrenzenden Gebiet von Baden-Württemberg durch eine geringe laterale Variabilität der Fazies und eine relativ einheitliche Lithologie aus (Allia 1996; NAGRA 2002).

In Baden-Württemberg weist die Opalinuston-Formation eine deutliche Zweiteilung auf und besteht im unteren Bereich aus der Teufelsloch-Subformation und im oberen Bereich aus der Zillhausen-Subformation. Faziell lassen sich darin folgende Unterschiede feststellen: Die Teufelsloch-Subformation im Liegenden besteht aus vollmarin-subtidalen Schlammgrund-Ablagerungen mit geringer Bodenströmung. Massenaufreten von *Bositra* und teilweise geringe Bioturbation deuten auf zeitweilig dysoxische Bedingungen in Bodennähe hin. In der hangenden Zillhausen-Subformation findet sich ein zunehmender Übergang in Sandgrund-Ablagerungen mit geringmächtigen subtidalen Sandbänken (Wasserfallbänke, Zopfplatten mit Wühlgefügen) und örtlich eingeschalteten tempestitischen Aufarbeitungslagen (Geröllkalkbänke, Belemnitenbrekzien) (Franz & Nitsch 2009).

Lithologie

Die Opalinuston-Formation besteht aus Tonsteinen und Tonmergelsteinen und weist im höheren Abschnitt regional Sandsteineinschaltungen auf. Im unteren Braunjura setzten sich die Bildungsbedingungen der Schwarzjura-Zeit zunächst fort. In einem ständig absinkenden Stillwasserbecken wurden bis 100 m mächtige, pyritreiche, organismenarme Tone abgesetzt, die heute als Opalinuston bezeichnet werden (Meyer & Schmidt-Kaler 1996). Die Opalinuston-Formation im süddeutschen Raum besteht überwiegend aus leicht schluffigen Tonsteinen. Die dunkelgraue bis schwarze Farbe ist auf feinverteilten Pyrit und geringe Mengen (größer 3 %) organisches Material zurückzuführen (Geyer et al. 2011; Hoth et al. 2007). Die Tonsteine sind wenig gegliedert, jedoch unterscheiden sich die Abschnitte der Formation im Feinsandanteil oder im Kalkgehalt. Die Schluff- bzw. Feinsandlinsen können bis zu 20 cm mächtig sein und sind teilweise auch kalkig zementiert. Des Weiteren treten Einschaltungen von knolligen Hartgründen, Siderit- und Kalkkonkretionen und Pyrit in Form von Konkretionen auf (Amelung et al. 2007). Im

obersten Abschnitt schalten sich in zunehmend sandige und mergelige Gesteine (Wasserfallsschichten) in die Abfolge ein. Darüber folgt ein sandarmer Tonstein-Horizont, in den sich nach oben hin wieder vermehrt kalkige Feinsandstein-Linsen und Platten einschalten. Diese Schichten sind nach der auffälligen Weidespur (*Gyrochorte*) Zopfplattenschichten benannt. Die Zopfplattenschichten sind wie die Wasserfallsschichten noch dem Dogger α zuzuordnen, die Grenze zum Dogger β wird heute an die Basis der Comptumbänke gelegt (Geyer et al. 2011).

Die Hauptgemengteile der Opalinuston- Formation sind Illit, Kaolinit und Chlorit, die Nebengemengteile Quarz sowie ein quellfähiges Illit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineral (Henke & Hiller 1985; Merklein-Lempp 1985). Die genaue Tonmineralzusammensetzung wird in der Literatur allerdings sehr unterschiedlich angegeben, wie die folgenden Variationsbreiten zeigen: 18 % – 36 % Illit, 6 % – 12 % Chlorit, 10 % – 20 % Kaolinit und 6 % – 12 % Illit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineral (Schmidt 1996).

Mächtigkeit

Die Mächtigkeit des gesamten Braunen Jura liegt maximal bei über 400 m im südlichen Oberrheingrabens und im Tafeljura bei maximal über 300 m (Geyer et al. 2011). Nach Bohrergebnissen erreicht die gesamte Opalinuston- Formation mit 120 m – 150 m ihre größte Mächtigkeit unter der mittleren Alb im Raum zwischen Spaichingen und Göppingen (Geyer et al. 2011).

Die Mächtigkeiten der Teufelsloch-Subformation variiert im Ausstrichgebiet zwischen 90 m und 100 m, nach Tiefbohrungen im Raum Bruchsal bis zu Werten von mehr als 120 m (Franz & Nitsch 2009). Die Zillhausen-Subformation als oberer Teil der Opalinuston-Formation zeigt kleinräumig stark wechselnde Mächtigkeiten zwischen 11 m und 40 m (Franz & Nitsch 2009).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 266). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 173: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Daten-format	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
2	BW	LGRB	11867394/ 7264	ts	Landesmodell	3D-Modell von Baden-Württemberg (Rupf & Nitsch 2008)
3	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
4	DE	BGR	11844870_ 01/ 6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
5	BW	UMBWL	11873083_ 01/7767	csv	datenbank_export_adb	Bohrdatenbank Baden-Württemberg
6	DE	BGE	11881896/ 8459	xlsx	BW_jmOPT_Marker	Aufbereitung der Schichtenverzeichnisse Baden-Württembergs
7	DE	BGR	11897915/ 9559	pdf	Regionale Tonstudie	Zwischenbericht zur Tonstudie (Krull et al. 2004)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23°StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Mittleren Jura in Baden-Württemberg geprüft wurde, ist in Tabelle 268 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 174: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitungsschritte mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Braunjura aus der Basisfläche Mitteljura	b_Braunjura_BW.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Braunjura_BW_MACRORESULT.ts
g) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	b_Braunjura_BW_MACRORESULT_AK.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Braunjura_BW_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_jm_BW.dxf MG_t_jm_BW.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Import der Bearbeitungsfläche aus 2i) als Polygondatensatz aus DXF-Datei in ArcGIS Pro sowie die txt-Datei als XY-Datensatz	
b) Fläche ohne z-Wert speichern und Polygone zusammenführen (Werkzeug „Zusammenführen (Dissolve)“)	MG_t_jm_BW_Copy_Diss.shp
c) Separieren der Fläche in Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Trennen“ und Flächenbedarf prüfen	MG_t_jm_BW_Copy_Diss_Flaeche.shp
d) Qualifizieren der Bearbeitungsfläche mit Bohrungsdaten	
e) Erzeugung einer Shape-Datei	MA_Gebiet_BW_jm.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 268 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell von Baden-Württemberg entstand im Kontext der geowissenschaftlichen Übersichtskartierung, es basiert auf einer lithostratigraphischen Gliederung (Rupf & Nitsch 2008). Im Rahmen der geologischen 3D-Modellierung wurden ältere, teils publizierte Eingangsdaten (Bohrungen etc.) überarbeitet und neu interpretiert. Unterschiede in der Verbreitung, Mächtigkeit und Raumlage einzelner Elemente zu anderen geologischen 3D-Modellen können daher aufgrund verschiedener Bearbeitungszeiträume und Modellierungsmethoden auftreten.

Das Landesmodell weist eine Top- und neun Basisflächen auf:

- Tertiär
- Oberjura
- Mitteljura
- Unterjura
- Keuper
- Muschelkalk
- Buntsandstein
- Zechstein
- Permokarbon,
- Grundgebirge (Topfläche)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 268 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Braunjura wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche Mitteljura verwendet (Tabelle 268, 2b).

Das digitale Geländemodell für Baden-Württemberg wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 268, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_1500m angehoben (Tabelle 268 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 268, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Braunjura und der Topfläche berechnet (Tabelle 268, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Malm sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM__{-300m}) zusammen (Tabelle 268, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM__{-1500m} angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht.

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungzonen für die ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert wurde (vgl. BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungzonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde (Tabelle 268, 2g). Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Maechtigkeit“ und „Tiefenlage“ in m u. GOK überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert (Tabelle 268, 2h).

Die Bearbeitungsfläche Braunjura wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 268 2i).

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Die aus dem 3D-Modell resultierende Bearbeitungsfläche Braunjura wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der Polygon-Datensatz der DXF-Datei ohne z-Wert gespeichert und in ein Polygon (ohne Vermaschung der 3D-Bearbeitungsfläche) zusammengeführt (Werkzeug „Zusammenführen (Dissolve)“, Tabelle 268, 3b). Die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ wurde geprüft und alle Polygone größer 10 km² wurden behalten (Tabelle 268, 3c).

Für die weitere Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Studien (Hoth et al. 2007; Krull et al. 2004; Reinhold et al. 2011) herangezogen sowie Bohrdaten der Tonstudie und der intern aufbereiteten Schichtenverzeichnisse der Bohrdatenbank Baden-Württemberg (Tabelle 266), um die lithologische Abfolgen des Mittleren Juras zu prüfen (Tabelle 268, 3d).

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bilden die „Geologie von Baden-Württemberg“ (Geyer et al. 2011) sowie die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007), deren Zwischenbericht von 2001 (Krull et al. 2004), die AnSichT-Studie (Reinhold et al. 2013) sowie das Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland (Reinhold et al. 2011).

Bohrdaten

Die Bohrdatenbank von Baden-Württemberg (vgl. Tabelle 176, DokID/Dateigruppe: 11873083_01/7767) wurde basierend auf der Stratigraphie des Opalinuston (jmOPT) sowie, falls ausgewiesen, die Subformationen Teufelsloch (jmopt) und Zillhausen (jmopz) sowie der hangenden Schicht ausgewertet und als interne Datenlieferung eingeladen (vgl. Tabelle 176, DokID/Dateigruppe: 11881896/8459). Die Mächtigkeit des Opalinuston wurde, falls vorhanden, separat für beide Subformationen aus der Differenz der „Bis Teufen“ (depth to, Basis der erbohrten Schicht) berechnet, Bohrungen, deren Endteufen mit der „Bis Teufe“ des Opalinuston zusammenfällt, wurden entfernt und in ArcGIS Pro dargestellt. Einige Bohrungen zeigen Mächtigkeiten der Teufelsloch-Subformation größer als 100 m, wie z. B. Veringenstadt 1 (7821_108, Tabelle 176). Bei Hinzunahme der Zillhausen-Subformation in die kumulative Mächtigkeitsberechnung weisen alle Bohrungen innerhalb der Bearbeitungsfläche Braunjura der Schwäbischen Alb eine ausreichende Mächtigkeiten auf. Im Oberrheingraben wurden ebenfalls Mächtigkeiten größer 100 m erbohrt (z. B. Mineral-Thermalwasserbohrung Bad Bellingen III, 8211_617, Tabelle 176).

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten (vgl. Tabelle 176, DokID/Dateigruppe: 11884574/8906) wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Aalenium und Bajocium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK innerhalb der Landesgrenzen von Baden-Württemberg geprüft. Die Ergebnisse der Tonstudie basierend auf der petrographischen Ansprache der Bohrungen bestätigen die zuvor ausgeführte, stratigraphische Auswertung für den Opalinuston und zeigen innerhalb der Bearbeitungsfläche Braunjura allesamt Tonsteingehalte größer als 80 % an. Dies belegen u. a. die Bohrungen Upflamör 1 (LOCID 29), Mühligen 1 (LOCID 30) und Laupertshausen 1 (LOCID 59), vgl. Tabelle 176). Für den Oberrheingraben wurden im Rahmen der Tonstudie keine Bohrungen ausgewertet.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5°StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen

werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotyphen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. In Jahn et al. (2016) sind Durchlässigkeitswerte (k_f -Wert) für den Opalinuston aufgelistet, die durch Packertests in Bohrungen an zwei Lokalitäten (Mont Terri und Bohrung Benken) ermittelt wurden, und alle Werte liegen Bereich oder unterhalb von 10^{-12} m/s.

Die Opalinuston-Formation an der Basis des Mittleren Jura (Aalenium) ist im Gebiet Baden-Württembergs aus leicht schluffigen Tonsteinen mit schiefriem Setzungsgefüge und feinverteilten Pyrit sowie geringe Mengen (größer als 3 %) organischem Material zusammengesetzt, in denen Schluff- und Feinsandlinsen auftreten können sowie im Hangenden, lateral begrenzt, kalkige Feinsandstein-Linsen und Platten eingeschaltet sind (Zillhausen-Subformation) (Geyer et al. 2011; Hoth et al. 2007). Die sandigen Anteile innerhalb der Opalinuston-Formation können die Gebirgsdurchlässigkeit beeinflussen. Da diese sandigen Anteile nicht flächenhaft auftreten, wird dieser Aspekt erst in späteren Phasen tiefergehend bearbeitet werden.

Die betrachteten Bohrungen der Tonstudie (Upflamör 1 (LOCID 29), Mühlingen 1 (LOCID 30) und Laupertshausen 1 (LOCID 59)) belegen Tonsteingehalte von mehr als 85 % im Aalenium. Daher kann die Annahme getroffen werden, dass die Opalinuston-Formation im Aalenium die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit **erfüllt**.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Mittleren Jura wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Mittleren Jura zusammen.

Als geeignete Tongesteins-Formation innerhalb des Mittleren Jura wurde die Opalinuston-Formation ausgewiesen. Alle Bohrung innerhalb der resultierenden Fläche im Gebiet der Schwäbischen Alb zeigen eine Mächtigkeiten des Opalinuston größer als 100 m an (z. B. Veringenstadt 1 (7821_108), Upflamör 1 (LOCID 29), Mühlingen 1 (LOCID 30) und Laupertshausen 1 (LOCID 59)). Im Gebiet des Oberrheingrabens zeigt eine Bohrung ein erfülltes Mächtigkeitskriterium innerhalb des verbleibenden Gebiets an (Mineral-Thermalwasserbohrung Bad Bellingen III, 8211_617). Daher wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ in dem verbleibenden Gebiet als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Mittleren Jura wurde im südlichen Teil anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem

wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde. Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Baden-Württemberg können Gebiete ausgewiesen werden, in denen Tongesteinsformationen des Mittleren Jura (Opalinuston-Formation) alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen. Diese sind im Ergebnismodell dargestellt (Abbildung 79).

Ergebnis

In Abbildung 79 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit Mittlerer Jura (Opalinuston-Formation) in Baden-Württemberg dargestellt. Abbildung 80 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge der ausgewiesenen Gebiete im Bereich der Schwäbischen Alb. Abbildung 81 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge der ausgewiesenen Gebiete im Bereich des Oberrheingraben.

Eine Auflistung dieser die Mindestanforderung erfüllenden Gebiete ist in Tabelle 175 zu finden.

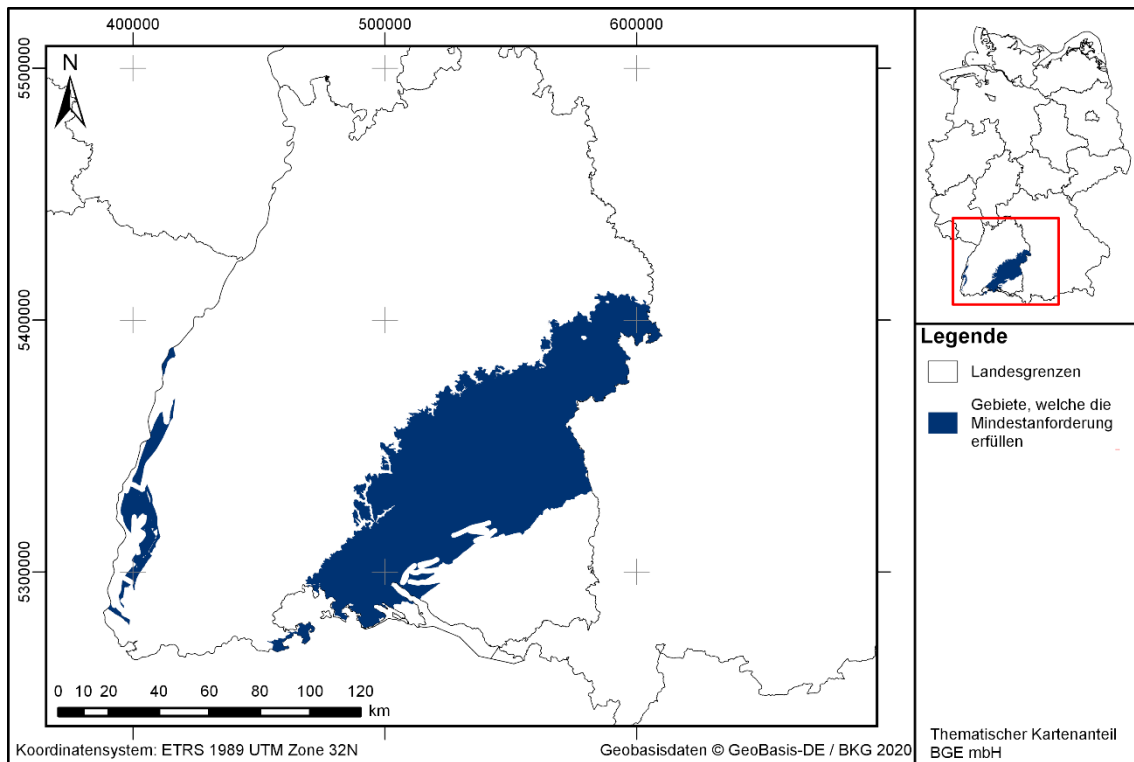


Abbildung 79: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen

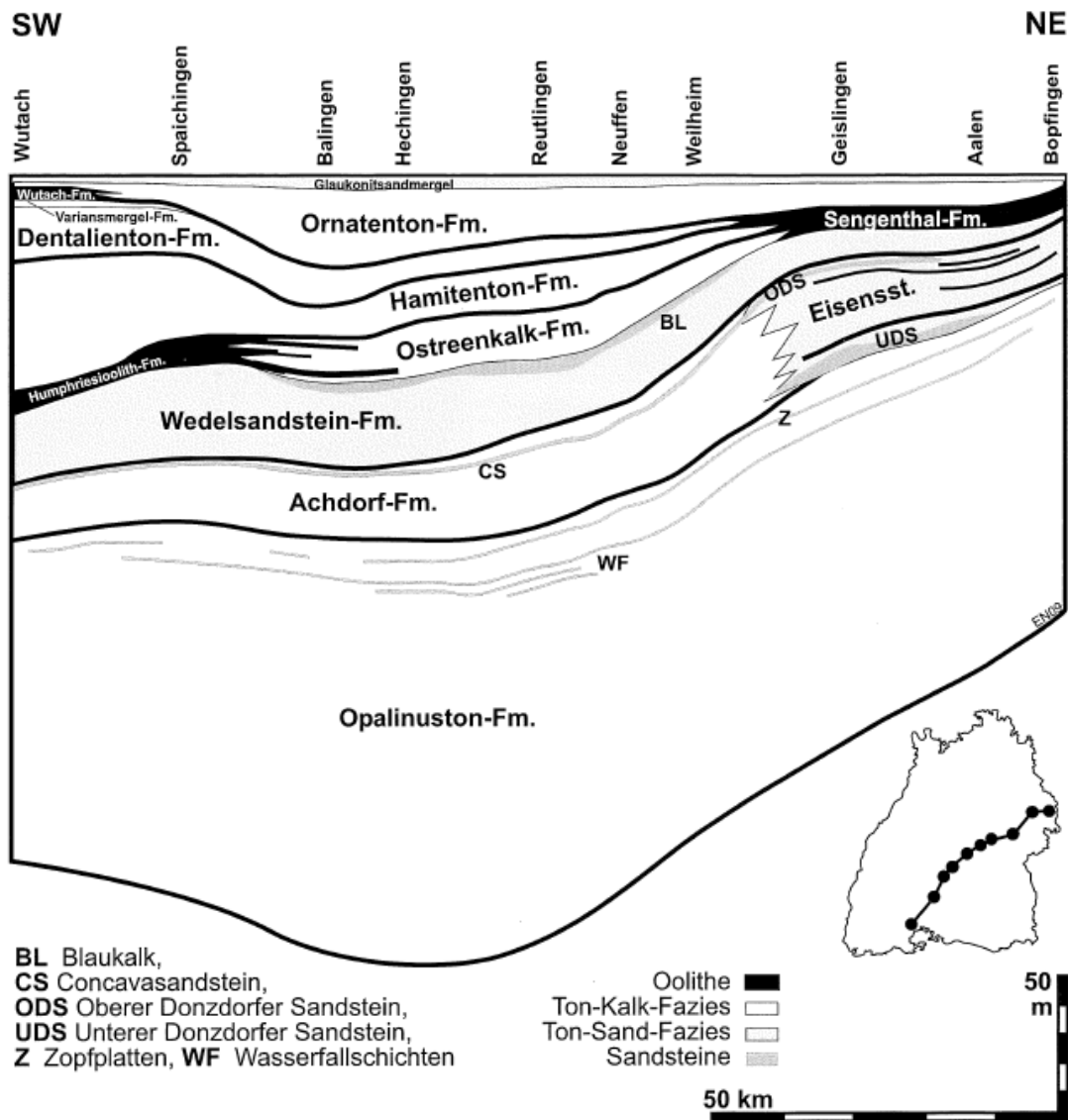


Abbildung 80: Fazies- und Mächtigkeitsentwicklung des Braunjura zwischen Wutach und Ries (Geyer et al. 2011)

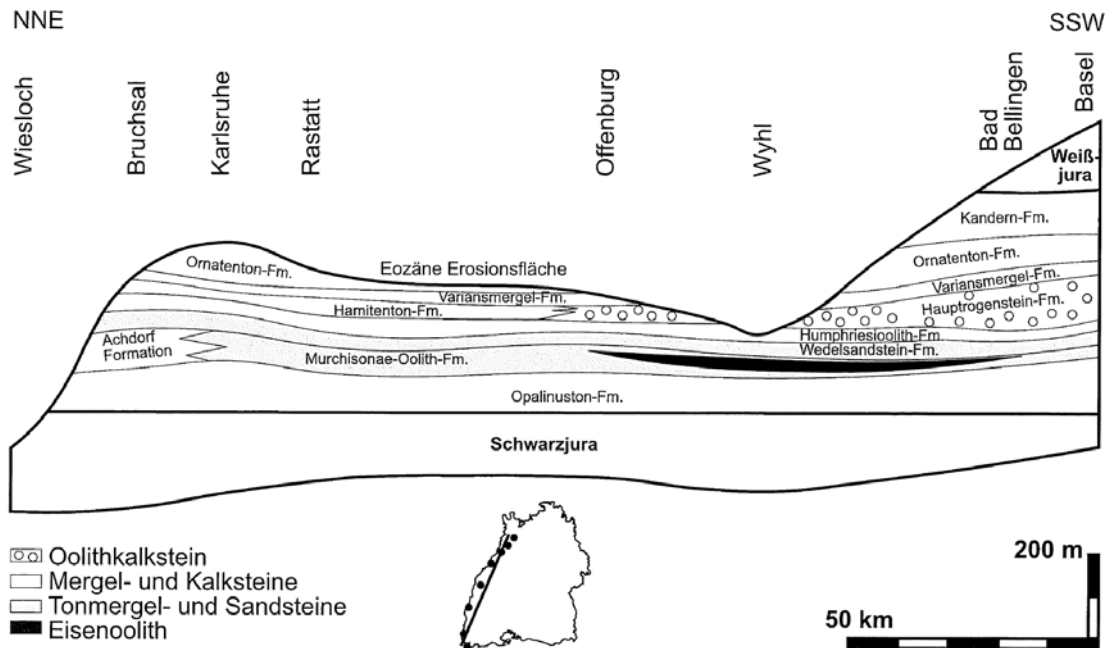


Abbildung 81: Fazies- und Mächtigkeitsentwicklung des Mittleren Jura im Gebiet des Oberrheingrabens.
 Die Grundlinie der Darstellung ist die Basis der Opalinuston-Formation (Geyer et al. 2011).

Tabelle 175: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, sowie deren Fläche

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_jm_BW_1	6853
MG_t_jm_BW_2	274
MG_t_jm_BW_3	122
MG_t_jm_BW_4	62
MG_t_jm_BW_5	19
MG_t_jm_BW_6	19
MG_t_jm_BW_7	16
MG_t_jm_BW_8	15
MG_t_jm_BW_9	12
MG_t_jm_BW_10	11

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 176 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 176: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11867394	7264		Landesmodell		3D-Modell von Baden-Württemberg
11881896	8459	160325	BW_jmOPT_Marker	7821_108 8211_617	Aufbereitung der Schichtenverzeichnisse Baden-Württembergs
11873083	7767	149232	datenbank_export_adb	Veringenstadt 1 Mineral-Thermalwasserbohrung Bad Bellingen III	Bohrdatenbank Baden-Württemberg
11884574	8906	2385812	Sueddeutschland_2000	Upflamör 1 (LOCID 29) Mühligen 1 (LOCID 30) Laupertshausen 1 (LOCID 59)	Bohrdatenbank der Tonstudie für Süddeutschland

1.3.22 Oberjura, Kandern-Fm. – Baden-Württemberg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Malm (Kandern-Formation), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Baden-Württemberg.

Im Falle der Kandern-Formation wurde keine Bearbeitung zur Anwendung der Mindestanforderungen durchgeführt, weil das gesamte Verbreitungsgebiet der Kandern-Formation innerhalb des Ausschlussbereiches des Ausschlusskriteriums „seismische Aktivität“ liegt.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Jura, Mitteljura (Dogger), Oberjura (Malm)

Die Kandern-Formation wird in der Literatur teils dem Dogger (Geyer et al. 2011; Franz 2009), teils dem Malm (Rupf & Nitsch 2008) zugeordnet,. Chronostratigraphisch ist die Kandern-Formation dem späten Callovium (Dogger) und frühen Oxfordium (Malm) zugeordnet (Geyer et al. 2011).

Geographische Verbreitung

Die Kandern-Formation ist in Deutschland ausschließlich im südlichen Oberrheingraben verbreitet, hauptsächlich jedoch in der Schweiz (dort als Sornetan-Member der Bärswil-Formation) (Rupf & Nitsch 2008; Geyer et al. 2011). Zur schwäbischen Alb hin schrumpft die Kandern-Formation auf wenige Meter Mächtigkeit und geht in die Ornatenton-Formation und den Kondensationshorizont der Glaukonitsandmergel über (Geyer et al. 2011).

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten des Dogger bzw. Malm und deren lithologische Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Baden-Württemberg (Kapitel 5) entnommen werden.

Lithologie (Franz 2009):

Die Kandern-Formation: unten: blaugraue Tonsteine bis graue, schwach feinsandige, feinglimmerige Tonmergelsteine; oben: Tonmergelsteine mit Lagen von zum Teil verkie-selten Kalkstein-Knollen

Mächtigkeit (Franz 2009):

Die Kandern-Formation weist eine maximale Mächtigkeit von 106 m in Deutschland auf. Die mittlere Mächtigkeit liegt zwischen 80 m und 106 m.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 177). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 177: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BGE	11893487/ 9209	shp	AL Seismizität	Ausschlussgebiet AK „seismische Aktivität“

Eigenrecherche

Thematische Karten

Zusätzlich wurden folgende thematische Karte recherchiert und verwendet:

Rupf & Nitsch (2008): Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse. – LGRB-Informationen, 21: 82 S., 10 Beil.; Freiburg i. Br.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Es wurden hier keine weiteren Arbeiten zur Überprüfung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG durchgeführt. Rupf & Nitsch (2008) beschreiben für die Kandern-Formation eine Verbreitung im südlichen Oberrheingraben. Der Bereich mit einer Mächtigkeit (des gesamten Malm) von über 100 m ist allerdings durch das Ausschlusskriterium „seismische Aktivität“ gemäß § 22 StandAG ausgeschlossen. Dies wird in Abbildung 82 dargestellt.

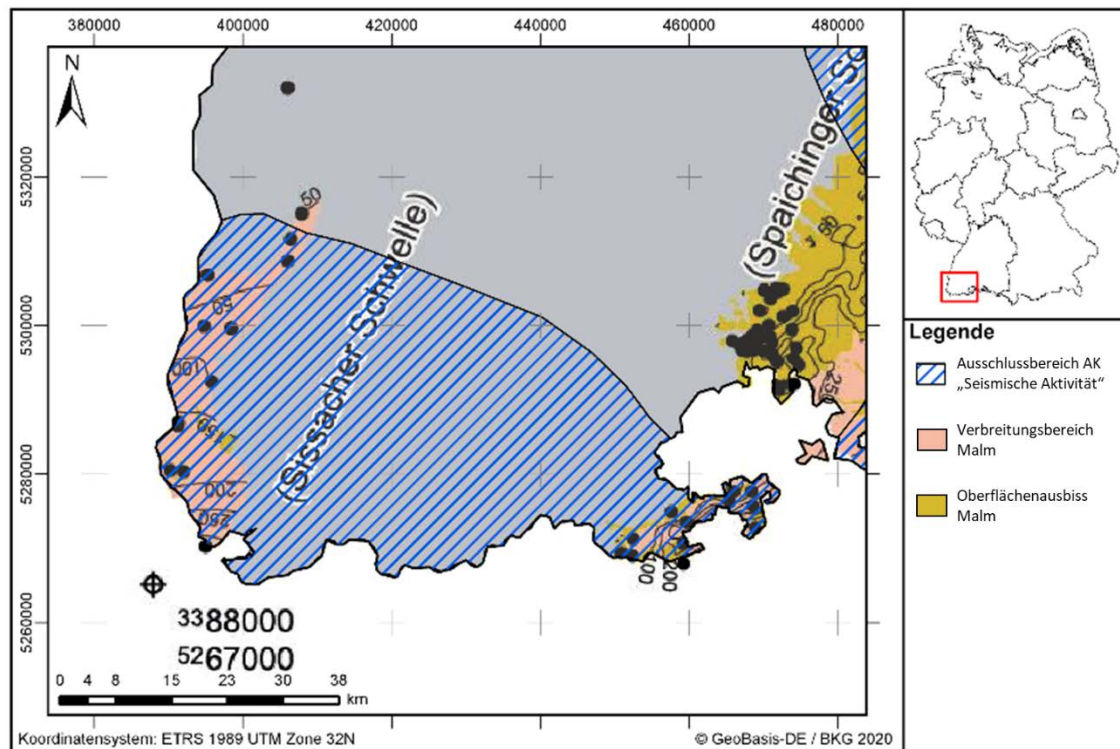


Abbildung 82: Verbreitung des Malm in Baden-Württemberg mit Mächtigkeitsisolinie (nach Rupf & Nitsch 2008) und Ausschlussbereich des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Die Erfüllung der Mindestanforderungen wurde nicht überprüft, da keine Gebiete, welche die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfüllen, erwartet werden, die ebenfalls nicht durch ein Ausschlusskriterium gemäß § 22 StandAG ausgeschlossen wurden.

Ergebnis

Im Rahmen der Bearbeitung wurden alle Gebiete ausgeschlossen, welche ein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen. Darüber hinaus konnten **keine Gebiete identifiziert** werden, die die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfüllen und nicht in einem ausgeschlossenen Gebiet liegen.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 178 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 178: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11893487	9209		AL Seismizität		Ausschlussgebiet AK „seismische Aktivität“

Entscheidungserhebliche thematische Karten

Rupf, I. & Nitsch, E. (2008): Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse. – LGRB-Informationen, 21: 82 S., 10 Beil.; Freiburg i. Br.

1. Abb. 27: Karte 9: Restmächtigkeiten und paläogeographische Situation im Oberjura.

1.3.23 Unterkreide – Brandenburg, Berlin

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG auf die Tongesteinabfolgen der Unterkreide, die aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung die Aufgaben eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gemäß § 2 StandAG potentiell erfüllen können. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Brandenburg.

Die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeit- oder paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Brandenburg, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie: Kreide, Unterkreide

Die Unterkreide ist in folgende Stufen untergliedert: Berriasium, Valanginium, Hauterivium, Barremium, Aptium, Albium. Eine Übersicht über die stratigraphischen Einheiten der Unterkreide und deren lithologische Ausprägung ist der tabellarischen Übersicht Brandenburgs zu entnehmen (siehe Kapitel 5.1). Das Berriasium stellt die stratigraphisch älteste Einheit der Unterkreide dar und beinhaltet die Fazies des „deutschen Wealden“, die in Brandenburg allerdings lithologisch nicht eindeutig von Ablagerungen des Oberjura zu unterscheiden sind (Voigt 2015). Mit Blick auf die Aufgaben des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und die damit an das Gestein bestehenden Eigenschaften kommen in Brandenburg für die Prüfung der Mindestanforderungen im Sinne der Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) das Berriasium (Unter-Berriasium) und Mittel- sowie Oberalium in Betracht. Somit ist belegt, dass die Unterkreide in Brandenburg tongesteinsführend ist. Da der überwiegende Teil der Unterkreide von tonigen Lithologien dominiert ist, wird in diesem Schritt des Verfahrens die Unterkreide als gesamte Einheit untersucht.

Geographische Verbreitung

Die Unterkreide ist hauptsächlich in der Südwestmecklenburg-Prignitz-Altmark-Westbrandenburg-Senke verbreitet und tritt mit starken Mächtigkeitsschwankungen zwischen

zentralen Beckenbereichen, (regionalen) Schwellen sowie dem Ostbrandenburgischen Hochgebiet auf (Diener 2000a; Voigt 2015). Auch in lokalen halokinetischen Randsenken sind stark variable Mächtigkeiten der Unterkreideformationen anzutreffen. Ablagerungen in den Schwellen- und Hochgebieten sind lediglich lückenhaft nachgewiesen.

Fazies-/Ablagerungsraum

Das Ablagerungsmilieu variiert in Brandenburg im Verlauf der Unterkreide von limnisch-brackischen Bedingungen während der Ablagerung der Wealden-Fazies (Berriasium) bis zu vorwiegend marinen bis zu brackischen (höheres Valanginium bis Unteres Albium) sowie offen marinen Verhältnissen (Albium). Diese Änderungen der Ablagerungsbedingungen treten trotz einer relativ konstanten Beckenkonfiguration zu dieser Zeit auf (Voigt 2015).

Lithologie (Diener 2000a; Voigt 2015)

Die einzelnen Stufen der Unterkreide lassen sich lithologisch wie folgt kurz beschreiben:

- Berriasium:
 - o Oberer Münder-Mergel: Tonsteine
 - o Serpilit: Ton- & Tonmergelsteine
 - o Wealden: Tonsteine, Siltsteine, Sandsteine, selten geringmächtige Flöze (bis 1 m)
- Valanginium:
 - o Altmark: Sandsteine, Schluffsteine, Mergelsteine, Kalksteine, Tonsteine
 - o Südwest-Brandenburg: Schichtlücke
 - o Ost-Brandenburg: Schichtlücke
- Hauterivium:
 - o Transgressionskonglomerat, Sandsteine
 - o Altmark: Tonsteine, Mergelsteine
 - o West-Brandenburg: Sandsteine, vereinzelt tonige Einlagerungen
 - o Ost-Brandenburg: Schichtlücke
- Barremium:
 - o Altmark: Tonsteine, Blättertone
 - o West-Brandenburg: Sandsteine
 - o Ost-Brandenburg: Schichtlücke
- Aptium:
 - o Blättertone, Fischschiefer, Mergelsteine (Hedbergellen-Mergel), kalkige Tonsteine
 - o Südwest-Brandenburg: Schichtlücke
 - o Ost-Brandenburg: Schichtlücke
- Albium:
 - o Tonsteine, Mergelsteine (minimus-Ton), Sandsteine

Mächtigkeit (Diener 2000a; Voigt 2015)

Nachfolgende Mächtigkeiten sind für die einzelnen Stufen der Unterkreide im Untersuchungsgebiet heranzuziehen:

- Berriasium:
 - o stark variable Gesamtmächtigkeit bis zu 1000 m (in synsedimentären halokinetischen Senken in West-Brandenburg, z. B. Rhinow, Barenthin)
 - o Südwest-Brandenburg: Gesamtmächtigkeit bis zu 170 m
 - o Ost-Brandenburg: Gesamtmächtigkeit bis zu 300 m
- Valanginium:
 - o Gesamtmächtigkeit 80 m – 100 m
 - o weit verbreitete Schichtlücken
- Hauterivium:
 - o stark variable Gesamtmächtigkeit bis zu 600 m (in synsedimentären halokinetischen Senken); nur wenige Meter in Hebungsgebieten und an lokalen/regionalen Schwellen
 - o Südwest-Brandenburg: Gesamtmächtigkeit bis zu größer als oder gleich 200 m
 - o Ost-Brandenburg: Schichtlücke
- Barremium:
 - o stark variable Gesamtmächtigkeit bis zu 300 m (in synsedimentären halokinetischen Senken); nur wenige Meter in Hebungsgebieten und an lokalen/regionalen Schwellen
 - o Südwest-Brandenburg: Schichtlücke
 - o Ost-Brandenburg: Schichtlücke
- Aptium:
 - o variable Gesamtmächtigkeit bis zu 100 m (in synsedimentären halokinetischen Senken in West-Brandenburg); durchschnittlich 20 m
 - o Südwest-Brandenburg: Schichtlücke
 - o Ost-Brandenburg: Schichtlücke
- Albium:
 - o Gesamtmächtigkeit bis zu 200 m
 - o Südwest-Brandenburg: Schichtlücke
 - o Ost-Brandenburg: Gesamtmächtigkeit bis zu größer als oder gleich 200 m

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 179). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 179: Auflistung verwendeter Eingangsdaten.

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/7 728	*.shp	Verwaltungsgebiete (VG25)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/8 853	ASCII	DGM10_dyn_mesh _tol10	Digitales Gelände- Modell
3	BB	LBGR	11878605/ 7872		Brandenburg 3D	3D-Modell (Schilling et al. 2018)
4	DE	BGR	11844870_0 1/6846	*.pdf	BGR_Tonstu- die2007	Studie der BGR (Hoth et al. 2007)
5	DE	BGR	11897915/9 564	*.pdf	Krull_e- tal_2004_Pot_Wirt sgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
6	DE	BGR	11897915/9 566	*.tif	Anlagen_Krull_e- tal_2004_Pot_Wirt sgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
7	DE	BGR	11884574/8 906	*.mdb	Norddeutsch- land_Ost.mdb	Bohrdatenbank der Studie von Hoth et al. (2007)
8	DE	BGR	11844870/6 834	*.shp	NiKo_kruBlaetter- tone_Verbrei- tung0m_V1_poly.s hp	Studie der BGR (Ladage et al. 2016)
9	DE	BGE	11894617/9 253	*.xlsx	2020_04_08_Über- gabe_TEK_GI_Zu- sätzliche_Bohrun- gen_nach Ab- gleich_MA	Bohrungsdaten
10	DE	BGR	11867242/7 206	*.shp	150_kru_iso.shp ch11_lcr_t	Tiefen- und Mächtig- keitsangaben der Unterkreidebasis des Petroleum Geo- logical Atlas of the Southern Permian Basin Area (Door- nenbal & Stevenson 2010)

Eigenrecherche

Folgende thematische Karten wurden verwendet:

- Hiß & Schönfeld (2000): Regionale Verbreitung und Faziesräume in der Bundesrepublik. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Redaktion: M. Hiß & J. Mutterlose) (2000): Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland. – Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, 226: 186 S., 68 Abb., 24 Tab.; Frankfurt a. M., <http://www.schweizerbart.de/pubs/isbn/sng/cfs-courie-3510610474-desc.html>
 1. Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Unterkreide (ohne transgressives Mittel- bis Ober-Albium) in Ostdeutschland
- Zentrales Geologisches Institut Berlin (Diener 1973) (Mächtigkeitskarten)
 1. Verbreitung der Unterkreide (Wealden bis Alb)
 2. Wealden/Valanginium
 3. Hauterivium
 4. Barremium/Unteralbium
- Zentrales Geologisches Institut Berlin (Diener 1973) (Fazieskarten)
 1. Übersichtsdarstellung der Ausbildung des Barrême bis Unteralb
 2. Übersichtsdarstellung der Ausbildung des Hauterive
 3. Beckenerweiterung im Wealden und Valangin
- Voigt (2015): *Kreide*. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. S. 240-256, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
 1. Die Verbreitung kreidezeitlicher Sedimente in Brandenburg nach Franke (2014)
 2. Verbreitung und Fazies der höheren Unterkreide (Hauterive bis Unteralb in Brandenburg nach Diener (1967), Scholl et al. (1969), Mutterlose & Bornemann (2000), Franke (2014)
 3. Verbreitung und Fazies der tieferen Unterkreide (Wealden; Berrias, z.T. tieferes Valangin) in Brandenburg nach Diener (1967), Scholl et al. (1969), Mutterlose & Bornemann (2000), Franke (2014)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Unterkreide in Brandenburg geprüft wurde, ist in Tabelle 180 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 180: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) beziehungsweise um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Unterkreide aus der Basisfläche T3-T4	b_Unterkreide_BB.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Unterkreide_BB_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Unterkreide_BB_MACRORESULT_qs.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_kru_BB.dxf MG_t_kru_BB.txt
2. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	Tongestein_Unterkreide_gesamt_MaGi.aprx
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	
3. Digitalisierung von 2D geologischen Informationen (Tongesteinsvorkommen und Mächtigkeit)	
a) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitung der tonigen Fazies der Fazieskarten (Diener 1973; Hiß 2000) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Brandenburgs	DDR_Barrene_Unteralb_tonige_Fazies_VG250_BB_Intersect.shp DDR_Hauterive_tonige_Fazies_VG250_BB_Intersect.shp DDR_Wealden_Valangin_tonige_Fazies_VG250_BB_Intersect.shp DtstratKomm_Verbreitungpräalbsche_UK_VG250_BB_Intersect.shp
b) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Fazieskarten der Unterkreide aus der „Geologie von Brandenburg“ (Voigt 2015) und Verschnitt mit dem Landesumriss Brandenburgs	Verbreitung_Unterkreide_BB_GeologievonBrandenburg.shp Tonsteine_Hauterive_Unteralb_BB_GeologievonBrandenburg.shp Pelit_Kalk_Berrias_Valangin_BB_GeologievonBrandenburg.shp Pelit_Sand_Berrias_Valangin_BB_GeologievonBrandenburg.shp
c) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung des Kartenmaterials der Tonstudie von Krull et al. (2004) und Verschnitt mit dem Landesumriss Brandenburgs	Krull_Tongestein_gr100_300bis1000GOK_potentiell_untersuchungswürdig_VG250_BB_Intersect.shp Krull_Tongestein_gr100_300bis1000GOK_untersuchungswürdig_VG250_BB_Intersect.shp Mächtigkeit_marine_Unterkreide_gr100m_Krull_2004_VG250_LAN_BB_Intersect.shp

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Alle Bohrungen aus der Tonstudie (Hoth et al. 2007) plotten und nach kumulativer Mächtigkeit und Tongehalt auswerten.	Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx
4. Plausibilitätsprüfung der Ausdehnung der Modellflächen aus 1. i und Bewertung des Materials aus 3. ggf. Erweiterung oder Reduktion der ausgewiesenen Flächen	
a) Verifizierung der Tiefenlage der Unterkreidebasis der ausgewiesenen Flächen durch den Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (Doornenbal & Stevenson 2010)	SPBA_Depth_Lower_Cretaceous.lpkx
b) Vergleich der Mächtigkeitsangaben der marinen Unterkreide aus der Tonstudie von Krull et al. (2004)	Mächtigkeit_marine_Unterkreide_gr100m_Krull_2004_VG250_LAN_BB_Intersect.shp
c) Vergleich der in der Tonstudie von Krull et al. (2004) ausgewiesenen Gebiete mit den durch die BGE ausgewiesenen Gebieten	Krull_Tongestein_gr100_300bis1000GOK_potentiell_untersuchungswürdig_VG250_BB_Intersect.shp Krull_Tongestein_gr100_300bis1000GOK_untersuchungswürdig_VG250_BB_Intersect.shp
d) Abgleich mit Bohrungsdaten, die außerhalb der ausgewiesenen Fläche liegen	Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx
5. Finale Ausweisung des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes. Nach Prüfung aus 4. konnte das Ergebnis aus 1 i) bestätigt und Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, übernommen werden	Mindestanforderungsgebiet_BB.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 180 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell Brandenburg 3D (B3D) wurde vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) in Zusammenarbeit mit dem Ge-

oforschungszentrum Potsdam (GFZ) entwickelt. Das Modellgebiet umfasst die Bundesländer Berlin und Brandenburg und enthält 12 reflexionsseismische Horizonte (Schilling et al. 2018):

- T1 (Transgressionsfläche Känozoikum)
- B2-T2 (Transgressionsfläche Mittelalb bis Cenoman)
- T3-T4 (Transgressionsfläche Unterhalb bis Wealden)
- E1-E2 (Intra-Oxford bis Kimmeridge)
- L1 (Intra-Toarc)
- K2 (Top Oberer Gipskeuper)
- M1 (Intra-Hauptmuschelkalk)
- S1 (Top Salinarröt)
- X1 (Top Zechsteinsalinar)
- Z1 (Top Unterer Staßfurtanhydrit)
- Z3 (Basis Werraanhydrit)
- R6 (Basis Oberrotliegend II)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 180 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, sodass die Arbeitsschritte Nr. 1a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Bearbeitungsfläche Unterkreide wurde auf Grundlage der Basisfläche T3-T4 erstellt (Tabelle 180, 1b), welche die Basis der Unterkreide-Tongesteine und den Top der Unterkreide-Sandsteine markiert (Göthel 2016).

Das digitale Geländemodell für Brandenburg und Berlin wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 180, 1a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 180, 1d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 180, 1e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Unterkreide und der Topfläche berechnet (Tabelle 180, 1c). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen B2-T2 und T1 sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 180, 1f). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“

tigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Falls in dem Bearbeitungsgebiet 3D-gepufferte Störungen vorhanden sind, wurde für diese ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert (vgl. BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde (Tabelle 180, 1g). Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 180, 1h).

Die Bearbeitungsfläche Unterkreide wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 180, 1i).

2D-Bearbeitung

Alle verwendeten Informationen (vgl. Eingangsdaten) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt. Die aus dem Geomodell extrahierten Flächen für Brandenburg, die eine Mindestmächtigkeit der Unterkreide von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK vorkommen, wurden zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet (Tabelle 180, 2). Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wurde.

Auswertung der thematischen Karten:

1. Alle in den Eingangsdaten aufgeführten Karten wurden vor der Auswertung falls nötig, digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert (Tabelle 180, 3a – 3c).
2. Das Kartenmaterial des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973) und aus Hiß (2000) wurde im Hinblick auf die Verbreitung und Mächtigkeit von tonigen Formationen der stratigraphischen Einheiten Wealden (Berriasium) und Valanginium, Hauterivium und Barremium bis Unteralbium digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert. Der Wealden (Berriasium) und das Valanginium wurde dabei zusammen dargestellt, da der allgemeine Aufbau und die Biostratigraphie für beide stratigraphische Einheiten schwer zu unterscheiden sind (Diener 1973). Es existiert keine genauere Differenzierung zwischen dem Barremium, Aptium und Unteralbium.
3. Das Kartenmaterial des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973), das Isolinien der Gesamtmächtigkeit der Unterkreide beinhaltet, wurde ebenfalls

digitalisiert und georeferenziert. Die anschließende Vektorisierung erfolgte auf Grund teils fehlender Angaben zu sekundären Mächtigkeiten lediglich basierend auf primären Mächtigkeiten. Der daraus resultierende Unsicherheitsfaktor der potentiellen Reduktion der Mächtigkeit zum Zeitpunkt der Ablagerung z. B. durch Erosion muss in Erwägung gezogen und mit den Angaben aus dem geologischen 3D-Modell geprüft werden. Bohrungsdaten und Schichtenverzeichnisse wurden als Referenzdatensätze zur Plausibilitätsprüfung der ausgewerteten Mächtigkeitskarten herangezogen.

4. Verschneiden der Ergebnisse der Mächtigkeitskarten mit denen der Fazieskarten: Ein Verschnitt zwischen den auf den Karten des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973) basierenden Polygonen der Verbreitung der tonigen Fazies und denen, die eine Mindestmächtigkeit größer als oder gleich 100 m der gesamten Unterkreide aufweisen, wurde unter Zuhilfenahme des ArcGIS Pro-Tools „Überschneiden“ durchgeführt, um die Mindestanforderungen Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit anzuwenden.

Abgleich mit Bohrungsdaten

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten (siehe Tabelle 180 und Tabelle 181) wurden im Hinblick auf den Tonanteil, die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation und die Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK innerhalb der Landesgrenzen von Brandenburg geprüft.

Ein Abgleich der Bohrungen mit den Ergebnissen der Mächtigkeits- und Fazieskarten erfolgte in folgenden Schritten (Tabelle 180, 3d):

1. Einladen der Bohrungen (Hoth et al. 2007)
2. Abgleich des Tonanteils und der kumulativen Mächtigkeiten der Bohrungsdaten mit den erzeugten Flächen.

Bewertung der Tongesteine aller Stufen

Basierend auf den oben beschriebenen digitalisierten thematischen Karten und Bohrungsdaten wurden alle Stufen der Unterkreide separat im Hinblick auf ihre Eignung als Tongestein, das die Aufgaben des ewG übernehmen kann, bewertet.

Berriasium bis Unteraptium

Die aus dem 3D-Modell Brandenburgs extrahierten Flächen decken die stratigraphischen Einheiten Berriasium (Wealden) bis Unteralbium ab. Eine Überprüfung durch die zur Verfügung stehenden Fazies- und Mächtigkeitskarten (Diener 1973; Hiß 2000; Voigt 2015) und durch Vergleich mit den Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) bestätigt die Ausdehnung der ausgewiesenen Flächen.

Mittelalbium bis Oberalbium

Das geologische 3D-Modell stellt keine Informationen bezüglich der Verbreitung toniger Fazies in adäquater Tiefenlage und Mächtigkeit für das Mittel- und Oberalium bereit. Aus diesem Grund bestand die Notwendigkeit, diese beiden stratigraphischen Einheiten basierend auf paläogeographischer Karten zu analysieren. Ein Verschnitt der Verbreitung der „Shale“-Fazies im Aptium und Alium auf Basis des Kartenmaterials des „Geological Atlas of Western and Central Europe“ (Ziegler 1990) mit der entsprechenden Mächtigkeitskarte des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973) erzeugte keine zusätzlichen Flächen abseits derjenigen, die durch das 3D-Modell erstellt wurden, sondern führten lediglich zu einer Überlagerung. Aus diesem Grund fand keine Erweiterung der existierenden Gebiete statt.

Fazit

Ein Abgleich der erstellten Flächen mit den Bohrungdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) zeigte, dass tonige Fazies mit adäquatem Tonanteil größer als 80 % (Hoth et al. 2007) sowie ausreichenden Mächtigkeiten und Tiefenlagen ausschließlich in den ausgewiesenen Gebieten liegen.

Ein weiterer Vergleich mit der regionalen Tonstudie von Krull et al. (2004) bestätigte ebenfalls die vorgenommene Ausweisung. Die von Krull et al. (2004) erstellten Flächen decken jedoch einen größeren Bereich ab als die des Landesmodells. Da die vorliegende Datengrundlage (Studien sowie Fazies- und Mächtigkeitskarten) jedoch keine Verifizierung dieser zusätzlichen Gebiete zulässt, wurde eine Erweiterung der mit Hilfe des 3D-Modells ausgewiesenen Flächen nicht vorgenommen.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammensetzung und der Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Die ausgewiesenen Flächen in Brandenburg beinhalten drei Bohrungen, die nach Hoth et al. (2007) einen Tonanteil größer als 80 % aufweisen (Tabelle 181) und diese somit verifizieren. Eine weitere Bohrung liegt jedoch außerhalb dieser Gebiete (Gransee 2/67, Zfö 1/64). Da die dort auftretende Mächtigkeit nicht den Mindestanforderungen entspricht, führt sie nicht zu einer Erweiterung der ausgewiesenen Gebiete.

Tabelle 181: *Übersicht über Bohrungen der Tonstudie der Tonanteilsklasse 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) in den Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen.*

Object-ID	LOCID	Long Name
474	124	Gransee 2/67
327	117	Fehrbellin 1/72
472	122	Rambow 102/64
264	130	Eldena 1/74

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten ist daher zu erwarten, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein der Unterkreide in Brandenburg **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit der Unterkreide wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit der Unterkreide zwischen der Transgressionsfläche Unterhalb-Wealden und der Transgressionsfläche Mittelalb bis Cenoman zusammen.

Die aus dem 3D-Modell hervorgegangenen Mächtigkeitsangaben wurden mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) überprüft und weitestgehend ausreichende Mächtigkeit von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Gebieten verifiziert.

Ein zusätzlicher Vergleich mit denen durch Krull et al. (2004) als „potentiell untersuchungswürdig“ eingestuft Gebieten bestätigt die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“. Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Unterkreide wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Die aus dem 3D-Modell hervorgegangenen Tiefenangaben wurden mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) überprüft und weitestgehend ausreichende Tiefenlagen von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Gebieten verifiziert. Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher als zunächst **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 83 wird das Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Einheit Unterkreide in Brandenburg und in Abbildung 84 ein geologisches Profil durch Brandenburg dargestellt, welches die sich über der Unterkreide liegenden Einheiten widerspiegelt.

Eine Auflistung dieser auch als „Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen“ bezeichneten Ergebnisflächen ist in Tabelle 182 zu finden.

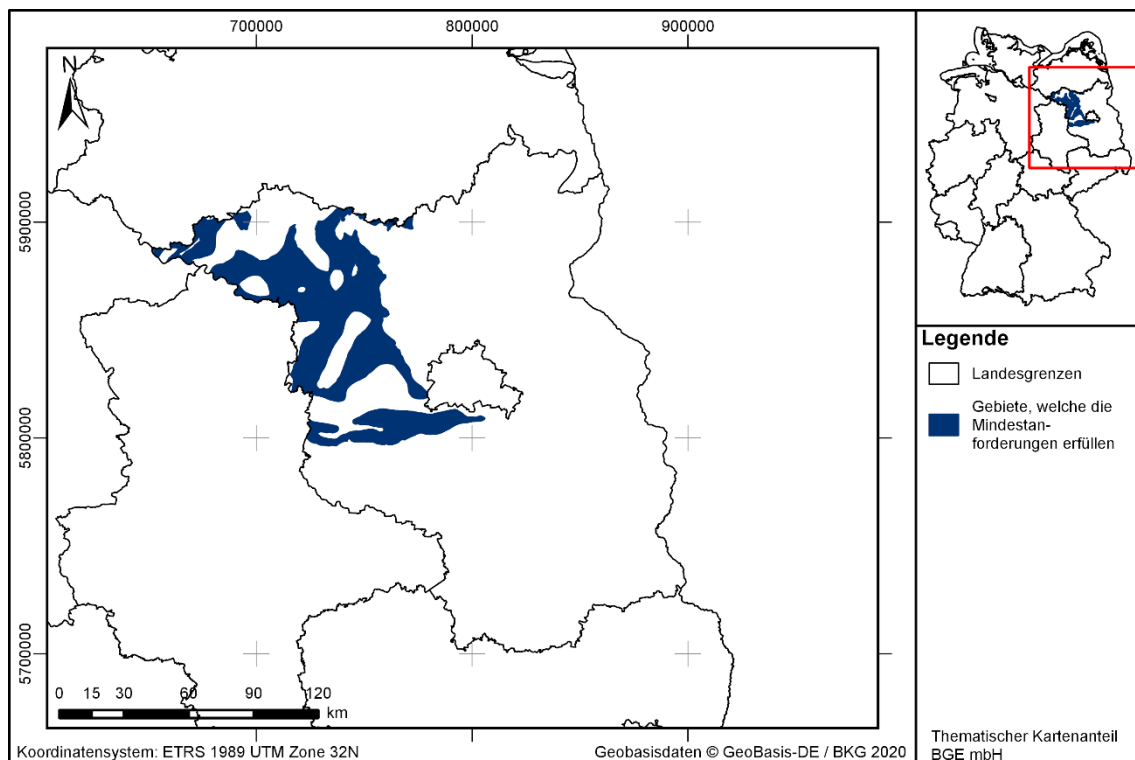


Abbildung 83: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Brandenburg.

Die blauen Flächen zeigen das Gebiet, das die Mindestanforderungen erfüllt.

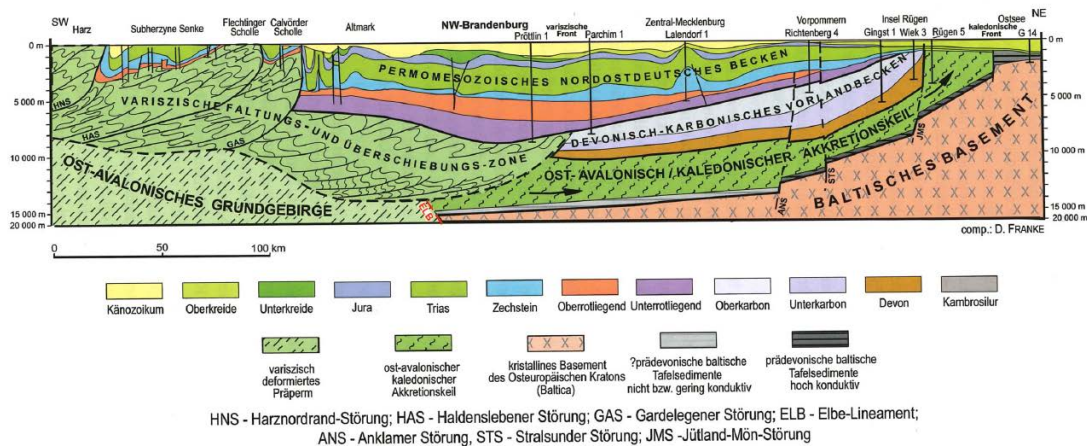


Abbildung 84: Geologisch-tektonischer Schnitt vom Harzvariszikum über Brandenburg bis zur Offshore-Bohrung G 14/1 in der südlichen Ostsee (Franke et al. 2015a)

Tabelle 182: Auflistung aller Gebiete in Brandenburg, die aus der Auswertung der Daten resultieren, mit Angabe der Flächengrößen

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_kru_BB_1	16
MG_t_kru_BB_2	34
MG_t_kru_BB_3	58
MG_t_kru_BB_4	63
MG_t_kru_BB_5	108
MG_t_kru_BB_6	112
MG_t_kru_BB_7	744
MG_t_kru_BB_8	1323

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 183 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft wurden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 183: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Datei-ID	Name des Datensatzes	Vermerk
11878605	7872		Brandenburg 3D	3D-Modell
11884574	8906	2385810	Norddeutschland_Ost.mdb Gransee 2/67 Fehrbellin 1/72 Rambow 102/64 Eldena 1/74	Bohrdatenbank Tonstudie; entscheidungserheblich: Tonanteilsklasse & kumulative Mächtigkeit

Entscheidungserhebliche Daten aus Eigenrecherche

ZGI (1979) UK_Mittel-OberAlb: digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Isolinien der Unterkreidemächtigkeiten größer als oder gleich 100 m im Mittel-Oberalbien (Diener 1973)

Geological Atlas_1990_Aptian-Albian: Paläogeographische Karten des Geological Atlas of Central and Western Europe; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen des Aptiums und Albium (Ziegler 1990)

1.3.24 Unterkreide – Niedersachsen, Bremen, Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG auf die Tongesteinabfolgen der Unterkreide, die aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Niedersachsen, das auch die Bundesländer Bremen und Hamburg beinhaltet.

Die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographischer Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in den Bundesländern Niedersachsen, Bremen und Hamburg, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Kreide, Unterkreide

Die Unterkreide ist in folgende Stufen untergliedert: Berriasium, Valanginium, Hauterivium, Barremium, Aptium, Albium. Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten der Unterkreide und deren lithologische Ausprägung sind der tabellarischen Übersicht Niedersachsens (siehe Kapitel 5) zu entnehmen.

Das Berriasium stellt die stratigraphisch älteste Einheit der Unterkreide dar. Alle Stufen sind im Verbreitungsgebiet vorhanden – insbesondere in einem ungefähr 100 km breiten Bereich von Bentheim bis in die Altmark, wo sie teils oberflächennah anstehen (Mutterlose 2000c). Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) wird in den Bundesländern Niedersachsen, Bremen und Hamburg das Berriasium (Ober-Berriasium), Valanginium, Hauterivium, Aptium und Albium betrachtet.

Geographische Verbreitung

Das Niedersächsische Becken lässt sich in vier Teile unterteilen, die nicht nur das Bundesland Niedersachsen, sondern auch Nordrhein-Westfalen, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern betreffen:

- Westlicher Teil: Emsland (Raum Rheine (Nordrhein-Westfalen)-Bentheim-Meppen-Gronigen (Niedersachsen)),
- Westlicher Zentralteil: Nördliches Wiehengebirgsvorland (Raum Osnabrück-Bielefeld-Minden (Nordrhein-Westfalen)-Vechta (Niedersachsen)),
- Östlicher Zentralteil (Raum Hannover-Braunschweig) und
- Ostteil (Teile von Brandenburg und Süd-Mecklenburg) (Mutterlose 2000c).

Die gesamte Unterkreide (Berriasium bis Albium) ist im Raum Hannover-Braunschweig vorhanden, jedoch sind vereinzelt Hiaten (Berriasium, Valanginium, Aptium und Albium) anzutreffen (Mutterlose 2000c). Auch im Niedersächsischen Bergland – insbesondere in der Hils-Mulde und in Randbereichen der Sack-Mulde – ist die Unterkreide verbreitet; das Valanginium tritt jedoch nur lückenhaft auf (Mutterlose 2000c).

Fazies-/Ablagerungsraum

Der Ablagerungsraum der Unterkreide ist in Niedersachsen von starken Variationen geprägt und tritt in Form einer nicht-marinen bis marinen Fazies auf (Mutterlose 2000c).

Lithologie

Die einzelnen Stufen der Unterkreide lassen sich lithologisch wie folgt kurz beschreiben (Mutterlose 2000c):

- Berriasium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): stark sandige Schüttungen in der Bückeberg-Formation, Kalk-, Mergel- und Tonsteine
 - Niedersächsisches Bergland: Tonsteine, kohleführende Schluffsteine
- Valanginium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Tonsteine
- Hauterivium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Wechselfolge aus Ton- und Mergelsteinen; im Mittleren Hauterivium: karbonatarme Tonsteine

- Niedersächsisches Bergland: Ton- und Mergelsteine
- Barremium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Tonsteine, Blättertone
 - Niedersächsisches Bergland: Tonsteine, Blättertone
 - Emsland: karbonatarmer Tonsteine mit eingeschalteten Blättertonlagen; im Ober-Barremium zum Teil sandig-tonige Einschaltungen
- Aptium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Unteres Aptium: Fischechiefer: Ton- & Mergelsteine; Mittleres Aptium: Hedbergellen-Mergel; Oberes Aptium: karbonatarmer Tonsteine
 - Niedersächsisches Bergland: Tonsteine
 - Emsland: karbonatarmer Tonsteine; Basis: Blätterton; Fischechiefer, Mergelsteine, Sandsteine (südliche Randfazies: Rothenburg-Sandstein)
- Albium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Ton- und Mergelsteine (Minimus-Ton)
 - Niedersächsisches Bergland: Unteres Albium: Hils-Sandstein, Mittleres Albium: Neohibolites Minimus Tone, Oberes Albium: Flammenmergel
 - Nord-Niedersachsen: Westerhever-Subformation: Mergelsteine bis mergelige Tonsteine (Minimus-Schichten)

Mächtigkeit

Nachfolgende Mächtigkeiten sind für die einzelnen Stufen der Unterkreide im Untersuchungsgebiet heranzuziehen (Mutterlose 2000c):

- Berriasium:
 - Niedersächsisches Bergland: Gesamtmächtigkeit bis zu 200 m (Raum Grünenplan-Delligsen)
 - Emsland: Gesamtmächtigkeit bis zu 400 m
- Valanginium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Gesamtmächtigkeit bis zu 100 m
 - Emsland: Gesamtmächtigkeit bis zu 350 m

- Hauterivium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Gesamtmächtigkeit bis zu 300 m
 - Niedersächsisches Bergland: Gesamtmächtigkeit bis zu 80 m
 - Emsland: Gesamtmächtigkeit bis zu 500 m
- Barremium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Gesamtmächtigkeit bis zu 200 m
 - Niedersächsisches Bergland: Gesamtmächtigkeit bis zu 20 m
 - Emsland: Gesamtmächtigkeit bis zu größer als oder gleich 400 m
- Aptium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Gesamtmächtigkeit bis zu 350 m
 - Niedersächsisches Bergland: Gesamtmächtigkeit bis zu 25 m
- Albium:
 - Zentralteil des Niedersächsischen Beckens (Raum Hannover-Braunschweig): Gesamtmächtigkeit bis zu 250 m
 - Niedersächsisches Bergland: Gesamtmächtigkeit bis zu 170 m
 - Emsland: Gesamtmächtigkeit bis zu 500 m

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 184). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 184: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Be-hörde	DokID/ GruppenID; Geschäfts- zeichen BGE	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/7 728	*.shp	Verwaltungsgebiete (VG25)	Verwaltungsgrenzen

Nr.	Bundesland	Be-hörde	DokID/ GruppenID; Geschäfts- zeichen BGE	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
2	NI	LBEG	11842295/ 7775	*.ts	BGE-GTA3D	3D-Modell für Nie- dersachsen, Ham- burg und Bremen (Bombien et al. 2012)
3	HH	BUE	11880284/8 434	*.ASCII/ *.ts	Export-GTA-HH.ts	3D-Modell von Ham- burg mit 2 Basis- und 1 Topfläche
4	DE	BKG	11865482/8 853	*.ASCII	DGM10_dyn_mes h_tol10	digitales-Gelände- Modell
5	DE	BGR	11844870_0 1/6846	*.pdf	BGR_Tonstu- die2007	Studie der BGR (Hoth et al. 2007)
6	NI	LBEG	11893484/ 9217	*.mdb	Bohr_dat.mdb	Kohlenwasserstoff- Bohrdatenbank
7	NI	LBEG	11893484/9 214	*.accdb	BDNGeodinExport Offshre tiefer 99m.accdb	Bohrdatenbank
8	NI	LBEG	11893484/9 220	*.shp	Nordseebohrun- gen_Nds.shp	Bohrdatenbank
9	NI	LBEG	11893484/9 217	*.pdf	201011000201_SV .pdf - 206008500102_SV .pdf	Schichtenverzeich- nisse
10	DE	BGR	11897915/9 564	*.pdf	Krull_e- tal_2004_Pot_Wirt sgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
11	DE	BGR	11897915/9 566	*.tif	Anlagen_Krull_e- tal_2004_Pot_Wirt sgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
12	DE	BGR	11897915/9 561	*.pdf	Wirth_2003_Li- tho_Petrophys	Studie der BGR
13	DE	BGR	11897915/9 566	*.tif	Anla- gen_Wirth_2003_L itho_Petrophys	Studie der BGR

Nr.	Bundesland	Be-hörde	DokID/ GruppenID; Geschäfts- zeichen BGE	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
14	DE	BGR	11884574/8 906	*.mdb	Norddeutsch- land_West.mdb	Bohrdatenbank der Studie von Hoth et al. (2007)
15	DE	BGR	11844870/6 834	*.shp	NiKo_kruBlaetter- tone_Verbrei- tung0m_V1_poly.s hp	Studie der BGR (Ladage et al. 2016)
16	DE	BGE	11894617/9 253	*.xlsx	2020_04_08_Über- gabe_TEK_GI_Zu- sätzliche_Bohrun- gen_nach Ab- gleich_MA	Bohrungsdaten
17	DE	BGR	11867242/7 206	*.shp	150_kru_iso.shp ch11_lcr_t	Tiefen- und Mächtig- keitsangaben der Unterkreidebasis des Petroleum Geo- logical Atlas of the Southern Permian Basin Area (Doornenbal & Stevenson 2010)

Eigenrecherche

Thematische Karten

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

- Ziegler, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. 130 pp. folder with 40 maps or charts. The Hague: Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.
 1. Aptian-Albian Paleogeography
 2. Berriasian-Valanginian Paleogeography
 3. Hauterivian-Barremian Paleogeography
- Zentrales Geologisches Institut Berlin (Diener 1973) (Mächtigkeitskarten)
 1. Verbreitung der Unterkreide (Wealden bis Alb)
 2. Wealden/Valanginium
 3. Barremium/Unteralbium

4. Mittel- bis Oberalium

- Zentrales Geologisches Institut Berlin (Diener 1973) (Fazieskarten)
 1. Beckenerweiterung im Wealden und Valangin
- Schott, W., Jaritz, W., Kockel, F., Sames, C. W., V. Stackelberg, V., Stets, J., Stoppel, D., Baldschuhn, R. & Krampke, K. D. (1969): *Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa*. Hannover: Bundesanstalt für Bodenforschung. ISBN ES184001000
 1. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Hauterive – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969)
 2. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Valendis – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969)
 3. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Hauterive – Fazies und Mächtigkeiten
 4. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Barreme – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969)
 5. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Apt – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969)
 6. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Alb – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969)
- Mutterlose, J. (2000): *4.3.1 Unterkreide im Niedersächsischen Becken*. In: S. K. Deutschlands (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland III: Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland*. Bd. 226, S. 207, Frankfurt am Main: Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft (CFS). ISBN 3-922907-68-2
 1. Verbreitung der Unter- und Oberkreide im Münsterländer Kreidebecken
 2. Paläogeographische Karte des nordwestdeutschen Beckens im Berrias
- Grabert, H. (1998b): *Die Unterkreide*. In: *Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen*. 1. Aufl., S. 351: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 978-3-510-65187-0
 1. Das Mitteleuropäische ("Germanische") Becken (abgedeckte Karte des Prätertiär) von Osnabrück und dem Weserbergland
- Hiss, M. & Schönfeld, J. (2000): Regionale Verbreitung und Faziesräume in der Bundesrepublik. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Redaktion: M. Hiß & J. Mutterlose) (2000): *Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland*. – Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, 226: 186 S., 68 Abb., 24 Tab.; Frankfurt a. M., <http://www.schweizerbart.de/pubs/isbn/sng/cfs-courie-3510610474-desc.html>
 1. Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Unterkreide (ohne transgressives Mittel- bis Ober-Albium) in Ostdeutschland

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Unterkreide in Niedersachsen, Bremen und Hamburg geprüft wurde, ist in Tabelle 185 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 185: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m u. GOK (DGM_-300m) bzw. um 1500 m u. GOK (DGM_-1500m) absenken	<i>DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts;</i> <i>DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts</i>
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Unterkreide aus der Basisfläche Unterkreide (aus allen Kacheln)	<i>b_Unterkreide_NI.ts</i>
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	<i>Topflaeche_kru.ts</i>
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit < 100 m löschen	<i>b_Unterkreide_NI_100m.ts</i>
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	<i>b_Unterkreide_NI_100m_qs.ts</i>
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	<i>MG_t_kru_NI.dxf</i> <i>MG_t_kru_NI.txt</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
2. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	<i>Tongestein_Unterkreide_gesamt_MaGi.aprx</i>
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	
3. Digitalisierung von 2D geologischen Informationen (Tongesteinsvorkommen und Mächtigkeit)	
a) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitung der tonigen Fazies der Fazieskarten der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Niedersachsens	<i>DDR_Wealden_Valangin_tonige_Fazies_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>Verbreitungprä_mittelalbische_Unterkreide_gesamt_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i>
b) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Mächtigkeitskarten der jeweiligen stratigraphischen Einheiten sowie der gesamten Unterkreide und Verschnitt mit dem Landesumriss Niedersachsens	<i>DDR_Mächtigkeit_krU_gesamt_gr100thickness_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>DDR_Mächtigkeit_Wealden_Valangin_gr100m_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>DDR_Mächtigkeit_krU_Mittel_Oberalb_gr100mthickness_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>DDR_Mächtigkeit_Barreme_Unteralb_gr100m_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i>
c) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitung der tonigen Fazies der Fazieskarten von (Ziegler 1990) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Niedersachsens	<i>GA_AptianAlbian_shale_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>GA_BerriasianValanginian_shale_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>GA_HauterivianBarremian_shale_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
<p>d) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Fazies- und Mächtigkeitskarten von (Mutterlose 2000c) und Verschnitt mit dem Landesumriss Niedersachsens</p>	<p><i>CFS_Verbreitung_Unterkreide_Münsterländer_Kreidebecken_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>CFS_Berrias_Nordwestdeutsches_Becken_tonig_gr400m_Teufe_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>CFS_Berrias_Nordwestdeutsches_Becken_tonig_kl400m_Teufe_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>CFS_Berrias_Nordwestdeutsches_Becken_sandig_tonig_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>CFS_Berrias_Nordwestdeutsches_Becken_tonige_Fazies_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i></p>
<p>e) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitungskarten nach Schott (1969) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Niedersachsens</p>	<p><i>Schott_1969_Verbreitung_Wealden_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>Schott_1969_Verbreitung_Hauterive_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>Schott_1969_Verbreitung_Valendis_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>Schott_1969_Verbreitung_Barrême_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>Schott_1969_Verbreitung_Apt_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>schott_et_al_1969_Wealden_bis_Apt_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>schott_et_al_1969_Wealden_bis_Alb_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i></p>
<p>f) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitungskarten nach (Grabert 1998a) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Niedersachsens</p>	<p><i>Verbreitung_Unterkreide_Grabert_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i></p>
<p>g) Alle Bohrungen aus den Bohrendatenbanken des LBEG plotten und Schichtenverzeichnisse auf Vorhandensein toniger Unterkreidefazies sowie deren Mächtigkeit und Tiefenlage prüfen.</p>	<p><i>LBEG_GEODIN_LOC_S3STAMM Teil 2_SV.lpkx</i> <i>LBEG_GEODIN_LOC_S3STAMM Teil 1_SV.lpkx</i> <i>LBEG_Nordseebohrungen_Nds.lpkx</i> <i>LBEG_BDN_Offshre_GEO-DIN_LOC_S3STAMM.lpkx</i> <i>LBEG_dbo_StammDaten_NI_BGE_accdb.lpkx</i></p>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
h) Alle Bohrungen aus der Tonstudie (Hoth et al. 2007) plotten und nach kumulativer Mächtigkeit und Tongehalt auswerten.	<i>Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx</i>
4. Plausibilitätsprüfung der Ausdehnung der Modellflächen aus 1.h) und Bewertung des Materials aus 3. gegebenenfalls Erweiterung oder Reduktion der ausgewiesenen Flächen	
a) Verifizierung der Tiefenlage der Unterkreidebasis und der Mächtigkeit der Unterkreide der ausgewiesenen Flächen durch den Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (Doornenbal & Stevenson 2010)	<i>SPBA_Depth_Lower_Cretaceous.lpkx</i> <i>SPBA_Thickness_Lower_Cretaceous.lpkx</i>
b) Vergleich der in den Tonstudie von Krull et al. (2004) ausgewiesenen Gebiete mit den durch die BGE ausgewiesenen Gebieten	<i>Mächtigkeit_marine_Unterkreide_gr100m_Krull_2004_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>Krull_Tongestein_gr100_300bis1000GOK_untersuchungswürdig_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i>
c) Auswertung und Vergleich mit der Blättertonverbreitung und Schwarzschieferverbreitung der NiKo-Studie (Ladage et al. 2016) und Verschnitt mit dem Landesumriss Niedersachsens	<i>NiKo_kruWealden_VerbreitungSchwarzschiefer0m_V1_poly_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i> <i>NiKo_kruBlattertone_Verbreitung0m_V1_poly_VG250_LAN_NI_Intersect.shp</i>
d) Abgleich mit Bohrungsdaten, die außerhalb der ausgewiesenen Fläche liegen	<i>Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx</i>
5. Finale Ausweisung des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes Nach Prüfung aus 4. konnte das Ergebnis aus 1h bestätigt werden und Gebiete die die Mindestanforderungen erfüllen übernommen werden	<i>Mindestanforderungsgebiete_NI.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 185 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Als Modellgrundlage dient der „Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und des deutschen Nordsee-Sektors“ GTA (Baldschuhn et al., 2001) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG), dessen digitale Umsetzung, der Geotektonische Atlas 3D (GTA 3D; Bombien et al. 2012), 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche abbildet:

Das hier verwendete geologische Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA 3D; Bombien et al. 2012) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell ist die digitale Umsetzung des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tpl = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg ab, sowie weite Teile von Niedersachsen bis auf den südlichen Bereich ab Höhe Göttingen. Die Flächen des GTA3D sind in 42 Kacheln untergliedert.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 185 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 1a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen Kachel-weise vor, daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Marine Unterkreide-Basisflächen (09_kru) erzeugt. Allerdings sind an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermaschung) offenkundig.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 185, 1a – e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Unterkreide und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen der Oberkreide, des Tertiär (Oberpaläozän bis Pliozän) und des Quartär sowie der um 300 m u. GOK abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 185, 1f).

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Maechtigkeit“ und „Tiefenlage“ m u GOK überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert (Tabelle 185, 1g).

Die Bearbeitungsfläche Unterkreide wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 185, 1h).

2D-Bearbeitung

Alle verwendeten Informationen (vergleiche Tabelle 185) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt. Die aus dem Geomodel extrahierten Flächen für Niedersachsen, Bremen und Hamburg, die eine Mindestmächtigkeit der Unterkreide von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK vorkommen, wurden zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wurde.

Kartenmaterial

Alle oben beschriebenen Karten wurden vor der Auswertung falls nötig digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert.

Besonderheiten in der Auswertung der thematischen Karten:

5. Das Kartenmaterial des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973) und von Hiß & Mutterlose (2000) wurde im Hinblick auf die Verbreitung und Mächtigkeit von tonigen Formationen der stratigraphischen Einheiten Wealden (Berriasium) und Valanginium, Hauterivium und Barremium bis Unteralbium digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert. Wealden (Berriasium) und Valanginium wurden dabei zusammen dargestellt, da allgemeiner Aufbau und Biostratigraphie der beiden stratigraphischen Einheiten schwer zu unterscheiden sind (Diener 1973). Es existiert keine genauere Differenzierung zwischen dem Barremium, Aptium und Unteralbium.
6. Das Kartenmaterial des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973), das Isolinien der Gesamtmächtigkeit der Unterkreide beinhaltet, wurde ebenfalls digitalisiert und georeferenziert. Die anschließende Vektorisierung erfolgte auf Grund teils fehlender Angaben zu sekundären Mächtigkeiten lediglich basierend auf primären Mächtigkeiten. Der daraus resultierende Unsicherheitsfaktor der potentiellen Reduktion der Mächtigkeit zum Zeitpunkt der Ablagerung z. B. durch Erosion musste in Erwägung gezogen und mit den Angaben aus dem geologischen 3D-Modell geprüft werden. Bohrungsdaten und Schichtenverzeichnisse wurden als Referenzdatensätze zur Überprüfung der Repräsentativität der ausgewerteten Mächtigkeitskarten herangezogen.
7. Die Verbreitungskarten der Fazies „Shale“ des Geological Atlas of Western and Central Europe (Ziegler 1990) wurde ebenfalls digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert, um den südlichsten Teil Niedersachsens, der nicht durch das Geomodell abgedeckt wurde, auf das Vorkommen toniger Fazies zu prüfen.
8. Verschneiden der Ergebnisse der Mächtigkeitskarten mit denen der Fazieskarten:

Ein Verschnitt zwischen den auf den Karten des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973) basierenden Polygonen der Verbreitung der tonigen Fazies und denen, die eine Mindestmächtigkeit größer als oder gleich 100 m der gesamten Unterkreide aufweisen, wurde unter Zuhilfenahme des ArcGIS Pro-Tools „Überschneiden“ durchgeführt, um die Mindestanforderungen „Mächtigkeit“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ anzuwenden.

Abgleich mit Bohrungsdaten

Das geologische Landesamt von Niedersachsen (LBEG) lieferte Bohrungsdaten und Schichtenverzeichnisse in Form von Datenbanken und PDF-Dateien (DokID/GruppenID: 11893484/9217; DokID/GruppenID: 11893484/9214; DokID/GruppenID:

11893484/9220; DokID/GruppenID: 11893484/9217). Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden zur Qualitätssicherung geprüft.

Zusätzlich wurden die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten auf den Tonanteil, die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation und die Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK innerhalb der Landesgrenzen von Niedersachsen, Bremen und Hamburg geprüft.

Ein Abgleich der Bohrungen mit den Ergebnissen der Mächtigkeits- und Fazieskarten erfolgte in folgenden Schritten:

3. Einladen der Bohrungen (Hoth et al. 2007; LBEG_GEODIN_LOC_S3STAMM Teil 2_SV.lpkx, LBEG_GEODIN_LOC_S3STAMM Teil 1_SV.lpkx, LBEG_Nordseebohrungen_Nds.lpkx, LBEG_BDN_Offshre_GEODIN_LOC_S3STAMM.lpkx, LBEG_dbo_StammDaten_NI_BGE_accdb.lpkx)
4. Im Falle der Landesbohrdatenbank: Abgleich der mit den Bohrungsdaten übermittelten Schichtenverzeichnisse mit den erzeugten Flächen.
5. Im Falle der Tonstudie: Abgleich des Tonanteils und der kumulativen Mächtigkeiten der Bohrungsdaten mit den erzeugten Flächen.

Bewertung der potentiellen Tongesteine aller Stufen:

Das durch das LBEG zur Verfügung gestellte 3D-Modell deckt die gesamte Fläche Bremens, Hamburgs und Niedersachsens bis auf den südlichsten Teil für die gesamte Unterkreide ab. Aus diesem Grund wurde zusätzliches geologisches und thematisches Kartenmaterial für die modellierten Bereiche lediglich zur Verifizierung der ausgewiesenen Gebiete genutzt. Für den südlichsten Teil Niedersachsens bilden sie die eigentliche Datengrundlage zur Ausweisung potentieller endlagerrelevanter Flächen.

Berriasium und Valanginium

In den stratigraphischen Einheiten Berriasium und Valanginium verifizieren Schott (1969), Ladage et al. (2016) und Mutterlose (2000c) die Verbreitung der Unterkreide in den ausgewiesenen Flächen und in Teilen des südlichsten Abschnitts Niedersachsens. Ein Verschnitt mit den vorhandenen Mächtigkeitskarten zeigt jedoch, dass im südlichen Teil Niedersachsens keinerlei Unterkreidevorkommen der berücksichtigten stratigraphischen Einheiten mit adäquater Mächtigkeit (größer als oder gleich 100 m) auftreten. Ein ebensolches Ergebnis erzielt die Überlagerung der Faziesverbreitung „Shale“ des „Geological Atlas of Western and Central Europe“ (Ziegler 1990) mit den Mächtigkeitskarten der gesamten Unterkreide des ZGI Berlin (Diener 1973). Die Fazieskarten des Berriasium der Deutschen Stratigraphischen Kommission (Hiß & Mutterlose 2000), die das Norddeutsche Becken behandeln, zeigen, dass die tonige Fazies auf den zentralen Teil des Beckens beschränkt ist und im südlichen Bereich Niedersachsens, der nicht durch das Geomodell analysiert werden konnte, in eine tonig-sandige Fazies übergeht, die jedoch nicht den Mindestanforderungen der „Gebirgsdurchlässigkeit“ und „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ entspricht.

Hauterivium und Barremium

Im Hauterivium und Barremium spiegelt sich die gleiche Situation wie im Berriasium und Valanginium wider. Auch hier zeigen die Verbreitungskarten zwar tonige Fazies an, die jedoch nur in den bereits ausgewiesenen Gebieten auch die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ erfüllt.

Aptium und Albium

Die im Untersuchungsgebiet weitflächig verbreiteten stratigraphischen Einheiten Aptium und Albium zeigen äquivalent zu den vorgenannten Stufen der Unterkreide nach Verschnitt des Kartenmaterials keine ausreichende Mächtigkeit der tonigen Fazies, die eine Erweiterung der bereits ausgewiesenen Gebiete gerechtfertigen würde.

Fazit

Ein Vergleich der Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) sowohl mit den durch das geologische 3D-Modell ausgewiesenen Gebieten als auch mit dem südlichen Teil Niedersachsens, das nicht durch die extrahierten Flächen analysiert werden konnte, bestätigt zunächst durch das Auftreten toniger Fazies der Tonanteilsklasse 1a (überwiegend größer 80 % Tonanteil) das Vorhandensein von Bereichen, welche die Mindestanforderungen „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ erfüllen. Er verifiziert ebenfalls den Ausschluss des südlichsten Teils Niedersachsens als potentielles Endlagerareal. Gleichzeitig werden die existierenden Flächen bestätigt. Dies ist nach Analyse der NiKo-Studie der BGR (Ladage et al. 2016) ebenfalls der Fall.

Ein zusätzlicher Abgleich mit den Schichtenverzeichnissen der Kohlenwasserstoff-Datenbank des geologischen Landesamtes liefert ebenfalls keine Gründe für eine Ausweitung der aus dem Landesmodell extrahierten Gebiete.

Die durch die regionalen Tonstudie von Krull et al. (2004) ausgewiesenen Gebiete bilden teils zusätzliche Flächen zu denen, die auf Basis des 3D-Modells ausgewiesen wurden. Eine Verifizierung dieser zusätzlichen Gebiete ist auf Basis der vorliegenden Bohrungsdaten und Schichtenverzeichnisse, Studien sowie Fazies- und Mächtigkeitskarten nicht möglich. Teilweise konnte jedoch ein Ausschluss dieser Gebiete auf Grund der Nichterfüllung der Mächtigkeitsanforderung erfolgen. Es findet somit keine Erweiterung der bereits ausgewiesenen Gebiete statt.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammensetzung und der Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen

werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithoty-
 pen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen
 jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräu-
 mige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu
 einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

In Tabelle 186 sind stichprobenhaft Bohrungen aus der Tonstudie von Hoth et al. (2007)
 aufgelistet, die adäquate Tonanteile (überwiegend größer 80 %) zeigen. Zwei dieser
 Bohrungen (LOCID 272, LOCID 56) liegen außerhalb der durch das Geomodell ausge-
 wiesenen Flächen. Die Berücksichtigung der Mächtigkeitsangaben zeigte jedoch, dass
 diese Bohrungen das entsprechende Mindestanforderungskriterium nicht erfüllen und
 somit nicht weiter berücksichtigt werden. Dementsprechend findet keine Erweiterung der
 ausgewiesenen Gebiete statt.

*Tabelle 186: Übersicht über stichprobenhaft ausgewählte Bohrungen der Tonstudie
 der Tonanteilklassen 1a und 1b (Tonanteil überwiegend größer als
 80 %) in Niedersachsen*

Object-ID	LOCID	Long Name
256	124	Meerdorf 37/1984
447	124	Meerdorf 37/1984
170	120	Hardesse T1/1968
254	120	Hardesse T1/1968
133	123	Lehrte-Ost 3/3a/1955
171	123	Lehrte-Ost 3/3a/1955
255	123	Lehrte-Ost 3/3a/1955
321	123	Lehrte-Ost 3/3a/1955
446	123	Lehrte-Ost 3/3a/1955
130	261	Kronsberg 21/1986
136	272	Sarstedt 3/1951
451	129	Eystrup 2/1960
53	210	Visbek-Valendis 1/1963
159	56	Volkensen Z 1/1976

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten ist daher zu erwarten, dass die
 Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein der Unterkreide in Nieder-
 sachsen, Hamburg und Bremen **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit der Unterkreide wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit der Unterkreide zusammen.

Die aus dem 3D-Modell hervorgegangenen Mächtigkeitsangaben wurden mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) sowie den vorliegenden Bohrungsdaten überprüft und ausreichende Mächtigkeit von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Gebieten verifiziert.

Ein zusätzlicher Vergleich mit denen durch Krull et al. (2004) als „potentiell untersuchungswürdig“ eingestuften Gebieten sowie der durch Krull et al. (2004) bereitgestellten Mächtigkeitskarte bestätigte die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“. Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Fläche der Unterkreide wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells (DGM) geprüft. Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK und oberhalb von 1500 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt.

Die aus dem 3D-Modell hervorgegangenen Tiefenangaben wurden mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) überprüft und ausreichende Tiefenlage von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Gebieten verifiziert.

Die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BTDS BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 85 ist das Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Einheit Unterkreide in Niedersachsen, Bremen und Hamburg und in Abbildung 86 ein geologisches Profil durch Niedersachsen dargestellt, welches die sich über der Unterkreide liegenden Einheiten widerspiegelt.

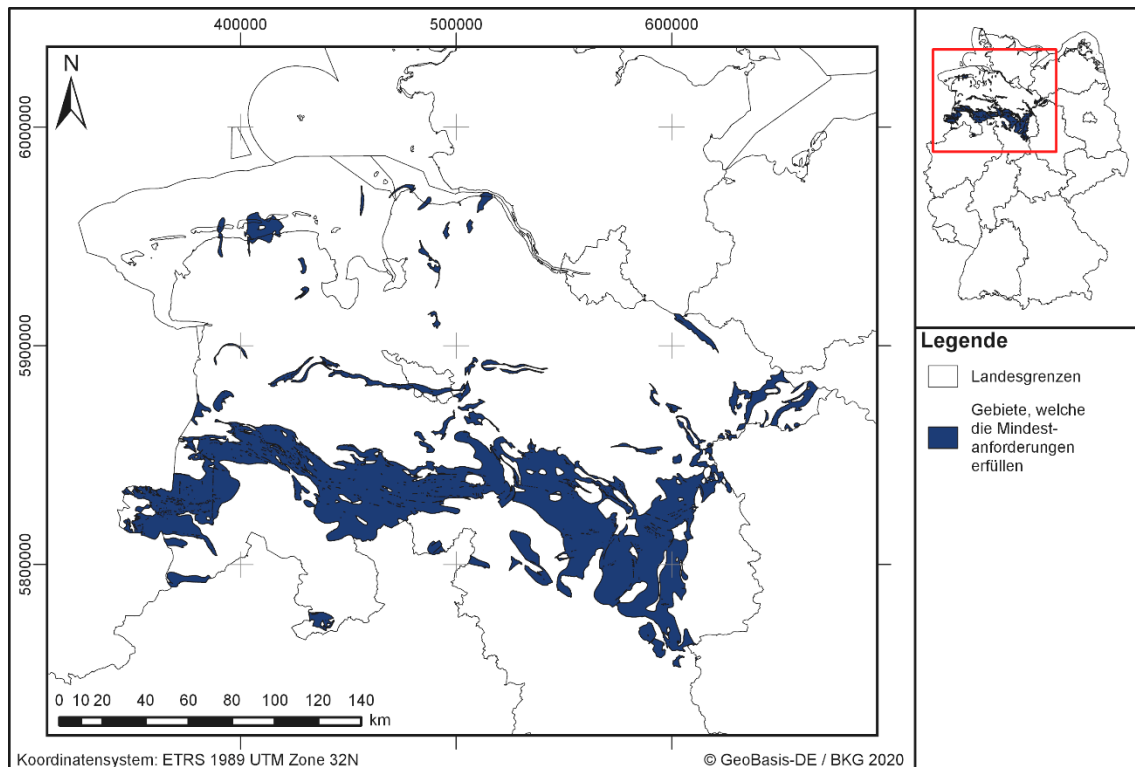


Abbildung 85: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Niedersachsen. Die blauen Flächen zeigen die Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

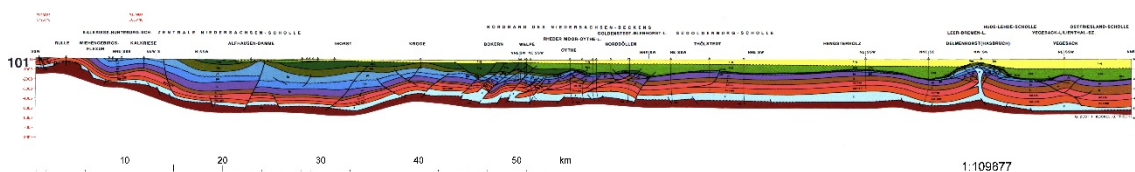


Abbildung 86: Geologischer Profilschnitt Niedersachsen (Baldschuhn et al. 2001)

Eine Auflistung dieser auch als „Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen“ bezeichneten Ergebnisflächen ist in Tabelle 187 zu finden.

Tabelle 187: Auflistung aller Gebiete in Niedersachsen, die aus der Auswertung der Daten resultieren mit Angabe der Flächengrößen. Flächen, die kleiner sind als 10 km², befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km²]
MG_t_kru_NI_1	< 1
MG_t_kru_NI_2	< 1
MG_t_kru_NI_3	< 1
MG_t_kru_NI_4	< 1
MG_t_kru_NI_5	1
MG_t_kru_NI_3	1
MG_t_kru_NI_7	1
MG_t_kru_NI_5	2
MG_t_kru_NI_9	3
MG_t_kru_NI_10	4
MG_t_kru_NI_11	5
MG_t_kru_NI_12	5
MG_t_kru_NI_13	6
MG_t_kru_NI_14	9
MG_t_kru_NI_15	10
MG_t_kru_NI_16	10
MG_t_kru_NI_17	10
MG_t_kru_NI_18	10
MG_t_kru_NI_19	10
MG_t_kru_NI_20	10
MG_t_kru_NI_21	11
MG_t_kru_NI_22	12
MG_t_kru_NI_23	12
MG_t_kru_NI_24	12
MG_t_kru_NI_25	12
MG_t_kru_NI_26	13
MG_t_kru_NI_27	13
MG_t_kru_NI_28	13
MG_t_kru_NI_29	13
MG_t_kru_NI_30	13
MG_t_kru_NI_31	13
MG_t_kru_NI_32	13
MG_t_kru_NI_33	14
MG_t_kru_NI_34	14
MG_t_kru_NI_35	14

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km²]
MG_t_kru_NI_36	14
MG_t_kru_NI_37	16
MG_t_kru_NI_38	16
MG_t_kru_NI_39	19
MG_t_kru_NI_40	25
MG_t_kru_NI_41	25
MG_t_kru_NI_42	28
MG_t_kru_NI_43	28
MG_t_kru_NI_44	29
MG_t_kru_NI_45	31
MG_t_kru_NI_46	32
MG_t_kru_NI_47	33
MG_t_kru_NI_48	33
MG_t_kru_NI_49	33
MG_t_kru_NI_50	36
MG_t_kru_NI_51	37
MG_t_kru_NI_52	38
MG_t_kru_NI_53	39
MG_t_kru_NI_54	57
MG_t_kru_NI_55	60
MG_t_kru_NI_56	67
MG_t_kru_NI_57	83
MG_t_kru_NI_58	95
MG_t_kru_NI_59	138
MG_t_kru_NI_60	156
MG_t_kru_NI_61	159
MG_t_kru_NI_62	170
MG_t_kru_NI_63	3598
MG_t_kru_NI_64	4054

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 188 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 188: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Gruppen-ID	Datei-ID	Name des Datensatzes	Vermerk
1184229 5	7775	24059 - 32474	BGE-GTA3D	3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
1188028 4	8434	160292	Export-GTA-HH.ts	3D-Modell von Hamburg mit 2 Basis- und 1 Topfläche
1188457 4	8906	238581 1	Norddeutschland_West.mdb Meerdorf 37/1984 Hardesse T1/1968 Lehrte-Ost 3/3a/1955 Kronsberg 21/1986 Sarstedt 3/1951 Eystrup 2/1960 Visbek-Valendis 1/1963 Volkensen Z 1/1976	Bohrdatenbank Tonstudie; entscheidungserheblich: Tonanteilklassse & kumulative Mächtigkeit (Hoth et al. 2007)

Entscheidungserhebliche Daten aus Eigenrecherche

DDR_Wealden_Valangin_ZGI_1973: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen der tonigen Fazies im Berriasium (Wealden) und Valanginium (Diener 1973)

ZGI (1979) UK_Barreme_UnterAlb: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Isolinien der Unterkreidemächtigkeiten größer als oder gleich 100 m im Barremium bis Unteralfium (Diener 1973)

Geological Atlas_1990_Aptian-Albian: Paläogeographische Karten des Geological Atlas of Central and Western Europe; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen des Aptium und Albium (Ziegler 1990)

Geological Atlas_1990_Berriasian-Valanginian: Paläogeographische Karten des Geological Atlas of Central and Western Europe; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen des Berriasium und Valanginium (Ziegler 1990)

Geological Atlas_1990_Hauterivian-Barremian: Paläogeographische Karten des Geological Atlas of Central and Western Europe; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen des Hauterivium und Barremium (Ziegler 1990)

CFS_Berrias_Nordwestdeutsches Becken: Paläogeographische Karte des Berriasium im Norddeutschen Becken; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen der tonigen und tonig-sandigen Fazies (Mutterlose 2000c)

1.3.25 Unterkreide – Nordrhein-Westfalen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG auf die Tongesteinabfolgen der Unterkreide, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Nordrhein-Westfalen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgte nach § 23 StandAG mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographischer Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Nordrhein-Westfalen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Kreide, Unterkreide

Die Unterkreide ist in folgende Stufen untergliedert: Berriasium, Valanginium, Hauterivium, Barremium, Aptium, Albium. Eine Übersicht über die stratigraphischen Einheiten der Unterkreide und deren lithologische Ausprägung sind der tabellarischen Übersicht Nordrhein-Westfalens (siehe Kapitel 5) zu entnehmen.

Das Berriasium stellt die stratigraphisch älteste Einheit der Unterkreide dar. Alle Stufen sind in Nordrhein-Westfalen verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden in Nordrhein-Westfalen stratigraphische Einheiten lokationsspezifisch in Betracht gezogen.

Geographische Verbreitung

Westteil des Niedersächsischen Beckens (Emsland: Raum Rheine (Nordrhein-Westfalen)-Bentheim-Meppen-Groningen (Niedersachsen (NI))), westlicher Zentralteil (nördliches Wiehengebirgsvorland: Raum Osnabrück-Bielefeld-Minden (Nordrhein-Westfalen)-Vechta (Niedersachsen), West-, Südost- und Zentral-Münsterland, Teutoburger Wald, Eggegebirge (Grabert 1998a; Mutterlose 2000d).

In Nordrhein-Westfalen sind vor allem im Emsland und im westlichen beziehungsweise zentralen Teil des Münsterlandes (potentiell) untersuchungswürdige Tongesteinsformationen vorhanden, was auf einen Meereshochstand im Niedersächsischen Becken während der gesamten Unterkreide zurückzuführen ist (Grabert 1998b) (siehe Kapitel 5)). Im Teutoburger Wald, dem Eggegebirge und im südöstlichen Münsterland sind keine potentiellen Tongesteine zu erwarten (siehe Kapitel 5).

Besonders im Emsland (Raum Lingen, Meppen, Adorf, Nordhorn, Bentheim, Ochtrup und Rheine) sind vor allem Sedimente der unteren stratigraphischen Einheiten der Unterkreide (Berriasium – Barremium) verbreitet; Aptium und Albium kommen nur lückenhaft vor (Mutterlose 2000d). Die Ablagerungen des Berriasium und Valanginium sind vor allem an halokinetische Strukturen gebunden.

Die Unterkreide ist im Teutoburger Wald weit verbreitet, tritt im Eggegebirge jedoch nur in der oberen Unterkreide auf (Mutterlose 2000d). Auch südlich des Wiehengebirges im Osnabrücker Bergland existieren keine Unterkreidevorkommen (Mutterlose 2000d).

Fazies-/Ablagerungsraum

Auf Grund des Meereshochstands im Niedersächsischen Becken während der gesamten Unterkreide befindet sich der zum Becken gehörende Randbereich im Norden Nordrhein-Westfalens sowie Teilstücke des Nordmeeres hauptsächlich in einem marinen Sedimentationsmilieu. Vereinzelt treten Übergänge zu brackischen Ablagerungsräumen (brackisch-limnisch oder brackisch-marin, Berrias 2 und 3) auf (Grabert 1998c; Mutterlose 2000a).

Lithologie (Grabert 1998c; Mutterlose 2000a)

Die einzelnen Stufen der Unterkreide lassen sich lithologisch wie folgt kurz beschreiben:

- Berriasium:
 - Berriasium 1 (Katzberg-Folge; Äquivalent zum Oberen Münder-Mergel): Steinsalz und Anhydrit; im Bereich des Wiehengebirges Übergang zu toniger Fazies
 - Berriasium 2 (Serpulit-Folge): tonig bis mergelige Sedimente; im Teutoburger Wald Basalkonglomerat
 - Übergang Berriasium 2 und 3: rote Tonsteine, bituminöser Stinkkalk
 - Berriasium 3 (Bückeberg-Folge und „deutscher Wealden“): Tonsteine, Mergelsteine, Schillkalkstein; im Teutoburger Wald Sandsteine mit dünnen Steinkohleflözen (bis zu 20 cm Mächtigkeit)
- Valanginium:
 - Zentrum des Niedersächsischen Beckens: marine Tonsteine

- Randbereiche des Niedersächsischen Beckens: Sandsteine (Osning-Sandstein)
- Eggegebirge: kein Vorkommen
- Nördliches Wiehengebirgsvorland: Ton-, Schluff- und Mergelsteine, Karbonate
- Hauterivium:
 - Basiskonglomerat, Quarzsandsteine (*noricum*-Sandstein, Gildehaus Sandstein), Tonsteine
 - Eggegebirge: kein Vorkommen
- Barremium:
 - Emsland/West- und Zentral-Münsterland: karbonatarme Tonsteine mit eingeschalteten Blättertonlagen; im Ober-Barremium zum Teil sandig-tonige Einschaltungen
 - Teutoburger Wald: Sandsteine
 - Eggegebirge: kein Vorkommen
 - Nördliches Wiehengebirgsvorland: dunkle Tonsteine
- Aptium:
 - Emsland/West- und Zentral-Münsterland: karbonatarme Tonsteine; Basis: Blätterton; Fischechiefer, Mergelsteine, Sandsteine (südliche Randfazies: Rothenburg-Sandstein)
 - Teutoburger Wald: Ton-, Schluff- und Sandsteine
 - Eggegebirge: Sandsteine
- Albium:
 - Unteralbium – Mittelalbium: Ton-, Mergel- und Sandsteine (Osning-Grünsand und Osning-Grünton)
 - Oberalbium: Flammenmergel, Tonsteine, kiesiger Mergelstein (Bielefeld)

Mächtigkeit (Grabert 1998c; Mutterlose 2000a)

Nachfolgende Mächtigkeiten sind für die einzelnen Stufen der Unterkreide im Untersuchungsgebiet heranzuziehen:

- Berriasium:
 - Emsland/West- und Zentral-Münsterland: Gesamtmächtigkeit bis zu 400 m

- Teutoburger Wald: Gesamtmächtigkeit bis zu 300 m
- Nördliches Wiehengebirgsvorland: Gesamtmächtigkeit bis zu 700 m im Beckenzentrum
- Valanginium:
 - variable Gesamtmächtigkeit: durchschnittlich 250 m; max. bis zu 500 m
 - Emsland/West- und Zentral-Münsterland: Gesamtmächtigkeit bis zu 350 m
- Hauterivium:
 - Gesamtmächtigkeit bis zu 500 m
 - Emsland/West- und Zentral-Münsterland: Gesamtmächtigkeit bis zu 500 m
- Barremium:
 - Emsland/West- und Zentral-Münsterland: Gesamtmächtigkeit bis zu größer als oder gleich 400 m
 - Nördliches Wiehengebirgsvorland: Gesamtmächtigkeit bis zu 400 m (Raum Minden)
- Aptium:
 - Gesamtmächtigkeit bis zu 200 m
- Albium:
 - Gesamtmächtigkeit bis zu 500 m

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 189). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 189: Auflistung verwendeter Eingangsdaten.

Nr.	Bundesland	Be-hörde	DokID/ GruppenID; Geschäfts- zeichen BGE	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/7 728	*.shp	Verwaltungsge- biete (VG25)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/8 853	ASCII	DGM10_dyn_mesh _tol10	digitales-Gelände- Modell

Nr.	Bundesland	Be-hörde	DokID/ GruppenID; Geschäfts- zeichen BGE	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
3	NW	GD NRW	11883267/8 849	ts	Landesmo- dell_NRW	3D-Landesmodell von NRW
4	NW	GD NRW	11842255/7 538	shp	Unterkreide_b	Isolinien der Basis- fläche Unterkreide
5	NW	GD NRW	11842255/7 539	shp	Unterkreide_t	Isolinien der Topflä- che Unterkreide
6	NW	GD NRW	11842255/7 538	shp	Unterkreide_Ver- breitung	Verbreitung der Un- terkreide
7	DE	BGR	11844870_0 1/6846	*.pdf	BGR_Tonstu- die2007	Studie der BGR (Hoth et al. 2007)
8	DE	BGR	11897915/9 564	*.pdf	Krull_e- tal_2004_Pot_Wirt sgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
9	DE	BGR	11897915/9 566	*.tif	Anlagen_Krull_e- tal_2004_Pot_Wirt sgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
10	DE	BGR	11884574/8 906	*.mdb	Norddeutsch- land_West.mdb	Bohrdatenbank der Studie von (Hoth et al. 2007)
11	DE	BGR	11844870/6 834	*.shp	NiKo_kruWeal- den_Verbrei- tungSchwarzschie- fer0m_V1_poly	Studie der BGR (Ladage et al. 2016)
12	DE	BGE	11894617/9 253	*.xlsx	2020_04_08_Über- gabe_TEK_GI_Zu- sätzliche_Bohrun- gen_nach Ab- gleich_MA	Bohrungsdaten
13	DE	BGR	11867242/7 206	*.shp	150_kru_iso.shp ch11_lcr_t	Tiefen- und Mächtig- keitsangaben der Unterkreidebasis des Petroleum Geo- logical Atlas of the Southern Permian Basin Area (Doornenbal & Stevenson 2010)

Nr.	Bundesland	Be-hörde	DokID/ GruppenID; Geschäfts- zeichen BGE	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
14	NRW	GD NRW	11842255/ 7538, 7539, 7540	*.shp	NRW_Unter- kreide_b_ct NRW_Unter- kreide_t_ct NRW_Unter- kreide_Verbrei- tung_Mächtigkeit erfüllt	Flächenauszüge Un- terkreide Geologi- scher Dienst NRW, Krefeld
15	NRW	GD NRW	11883267/ 8860	*.pdf	Schichtenverzeich- nisse.pdf	Schichtenverzeich- nisse zu Bohrungen der Bohrdatenbank NRW
16	NRW	GD NRW	11883267/ 8852	*.mdb	Boh- rung_NRW.mdb	Bohrdatenbank NRW

Eigenrecherche

Thematische Karten

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

- Ziegler, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. 130 pp. folder with 40 maps or charts. The Hague: Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.
 1. Aptian-Albian Paleogeography
 2. Berriasian-Valanginian Paleogeography
 3. Hauterivian-Barremian Paleogeography
- Schott, W., Jaritz, W., Kockel, F., Sames, C. W., V. Stackelberg, V., Stets, J., Stoppel, D., Baldschuhn, R. & Krampke, K. D. (1969): *Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa*. Hannover: Bundesanstalt für Bodenforschung. ISBN ES184001000
 1. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Haute-
rive – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969))
 2. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Valen-
dis – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969))

3. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Haute-rive – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969)
 4. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Bar-reme – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969)
 5. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Apt – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969)
 6. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Alb – Fazies und Mächtigkeiten (Schott et al.(1969)
- Mutterlose, J. (2000): Unterkreide im Niedersächsischen Becken. In: M. Hiß & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland. Bd. 226, S. 207, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
 1. Verbreitung der Unter- und Oberkreide im Münsterländer Kreidebecken
 2. Paläogeographische Karte des nordwestdeutschen Beckens im Berrias
 - Grabert, H. (1998b): *Die Unterkreide*. In: Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen. 1. Aufl., S. 351: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65187-0
 1. Das Mitteleuropäische („Germanische2) Becken (abgedeckte Karte des Prätertiär) von Osnabrück und dem Weserbergland

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Unterkreide in Nordrhein-Westfalen geprüft wurde, ist in Tabelle 190 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Vom Geologischen Dienst NRW (GD NRW) wurden GIS-Dateien der Verbreitung von Tongesteinen der Unterkreide Abfolge innerhalb des Teufenbereiches zwischen 300 m u. GOK und 2.000 m u. GOK geliefert (DokID_11842255/141/9367). Zudem erging der Hinweis darauf, dass diese vorgeschlagenen Gebiete auf dem „Geologischen 3D-Landesmodell“ basieren, das für weite Teile von Nordrhein-Westfalen als grobe Übersichtsdarstellung vorliegt.

Die durch den geologischen Dienst von Nordrhein-Westfalen bereitgestellten Informationen zur Verbreitung geeigneter Tongesteinshorizonte in Nordrhein-Westfalen wurden hinsichtlich ihrer Nachvollziehbarkeit geprüft. Die Nachvollziehbarkeit der gelieferten Shape-Dateien wurde anhand von durch den geologischen Dienst von Nordrhein-Westfalen übermittelten Bohrungen sowie dem geologischen Landesmodell Nordrhein-Westfalen bewertet.

Die Teufenlagen der Shape-Datei für die Basis Unterkreide konnten anhand des Vergleiches mit der Kreide-Basisfläche des Landesmodells nur für die nordwestliche Teilfläche nachvollzogen werden, in der nordöstlichen Teilfläche traten hohe Abweichungen auf. Daher erfolgte die Ausweisung von Gebieten, die alle Mindestanforderungen erfüllen, nach dem Konzept der Anwendung der Mindestanforderungen der BGE.

Tabelle 190: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m u. GOK (DGM_-300m) beziehungsweise um 1500 m u. GOK (DGM_-1500m) absenken	<i>DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts</i>
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Unterkreide aus der Basisfläche Unterkreide	<i>b_Unterkreide_NW.ts</i>
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	<i>Topflaeche_MACRO.ts</i>
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	<i>b_Unterkreide_NW_MACRORESULT.ts</i>
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	<i>b_Unterkreide_SH_MACRORESULT_qs.ts</i>
h) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	<i>b_Unterkreide_NW_MACRORESULT_AK.ts</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	<i>MG_t_kru_NW.dxf</i> <i>MG_t_kru_NW.txt</i>
2. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	<i>Tongestein_Unterkreide_gesamt_MaGi.aprx</i>
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	
3. Digitalisierung von 2D geologischen Informationen (Tongesteinsvorkommen und Mächtigkeit)	
a) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitung der tonigen Fazies der Fazieskarten von (Ziegler 1990) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Nordrhein-Westfalens	<i>GA_Berri- asianValanginian_shale_VG250_LAN_NRW_Inter- sect.shp</i> <i>GA_HauteriwianBar- remian_shale_VG250_LAN_NRW_Intersect.shp</i> <i>GA_AptianAlbian_shale_VG250_LAN_NRW_Inter- sect.shp</i>
b) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Fazies- und Mächtigkeitskarten von (Mutterlose 2000b) und Verschnitt mit dem Landesumriss Nordrhein-Westfalens	<i>CFS_Berrias_Nordwestdeutsches_Be- cken_tonige_Fazies_VG250_LAN_NRW_Inter- sect2.shp</i> <i>CFS_Berrias_Nordwestdeutsches_Be- cken_tonig_gr400m_Teufe_VG250_LAN_NRW_In- tersect1.shp</i> <i>CFS_Verbreitung_Unterkreide_Münsterlän- der_Kreidebecken_VG250_LAN_NRW_Inter- sect1.shp</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitungskarten nach (Schott 1969) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Nordrhein-Westfalens	<i>Schott_1969_Verbreitung_Valendis_VG250_LAN_NRW_Intersect1.shp</i> <i>Schott_1969_Verbreitung_Wealden_VG250_LAN_NRW_Intersect1.shp</i> <i>Schott_1969_Verbreitung_Hauterive_VG250_LAN_NRW_Intersect1.shp</i> <i>Schott_1969_Verbreitung_Barrême_VG250_LAN_NRW_Intersect1.shp</i> <i>Schott_1969_Verbreitung_Apt_VG250_LAN_NRW_Intersect1.shp</i> <i>schott_et_al_1969_Wealden_bis_Apt_VG250_LAN_NRW_Intersect1.shp</i> <i>schott_et_al_1969_Wealden_bis_Alb_VG250_LAN_NRW_Intersect1.shp</i>
d) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitungskarten nach (Grabert 1998c) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Nordrhein-Westfalens	<i>Verbreitung_Unterkreide_Grabert_VG250_LAN_NRW_Intersect2.shp</i>
e) Alle Bohrungen aus der Tonstudie (Hoth et al. 2007) plotten und nach kumulativer Mächtigkeit und Tongehalt auswerten.	<i>Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx</i>
4. Plausibilitätsprüfung der Ausdehnung der Modellflächen aus 1.i und Bewertung des Materials aus 3. gegebenenfalls Erweiterung oder Reduktion der ausgewiesenen Flächen	
a) Verifizierung der Tiefenlage der Unterkreidebasis der ausgewiesenen Flächen durch den Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (Doornenbal & Stevenson 2010)	<i>SPBA_Depth_Lower_Cretaceous.lpkx</i>
b) Vergleich der Mächtigkeitsangaben der marinen Unterkreide aus der Tonstudie von Krull et al. (2004)	<i>Mächtigkeit_marine_Unterkreide_gr100m_Krull_2004_VG250_LAN_NRW_Intersect.shp</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Vergleich der in der Tonstudie von Krull et al. (2004) ausgewiesenen Gebiete mit den durch die BGE ausgewiesenen Gebieten	<i>Krull_Tongestein_gr100_kl1500GOK_potentiell_untersuchungswürdig_VG250_LAN_NRW_Intersect.shp</i> <i>Krull_Tongestein_gr100_300bis1000GOK_untersuchungswürdig_VG250_LAN_NRW_Intersect.shp</i>
d) Auswertung und Vergleich mit der Schwarzschieferverbreitung der NiKo-Studie (Ladage et al. 2016)	<i>NiKo_kruWealden_VerbreitungSchwarzschiefer_VG250_LAN_NRW_Intersect.shp</i>
e) Abgleich mit Bohrungsdaten, die außerhalb der ausgewiesenen Fläche liegen	<i>Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx</i>
f) Abgleich mit den durch den Geologischen Dienst NRW bereitgestellten Flächen	
5. Finale Ausweisung des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes Nach Prüfung aus 4. konnte das Ergebnis aus 1.i bestätigt und Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, übernommen werden	<i>Mindestanforderungsgebiete_NRW.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 190 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell Nordrhein-Westfalen ist ein Übersichtsmodell dessen Grundlage häufig auf Ergebnissen aus unterschiedlichen Projekten beruht, deren Ergebnisflächen untereinander nicht konsistent abgestimmt wurden. Datenbasis und somit die Genauigkeit sind regional sehr unterschiedlich. Die Basisflächen Karbon Basis, Mitteldevon Basis, sowie die Einheiten „Emscher Formation“ und „Wealden Formation“ wurden nicht vollständig modelliert und sind lediglich angenäherte Darstellungen, um eine ungefähre Vorstellung von Tiefenlage und Mächtigkeit zu vermitteln.

Das Landesmodell weist eine Top- und elf Basisflächen für stratigraphische Einheiten sowie jeweils eine Top- und Basisfläche für Formationen auf:

- gg_q_b (Quartär Basis)
- gg_t_b (Tertiär Basis)
- gg_kroha_b (Halterner Sande Basis)

- gg_kro_b (Oberkreide Basis)
- gg_kr_b (Kreide Basis)
- gg_j_b (Jura Basis)
- gg_tr_b (Trias Basis)
- gg_z_b (Zechstein Basis)
- gg_r_b (Rotliegend Basis)
- gg_praep_t (Präperm Top)
- gg_c_b (Karbon Basis, unvollständig)
- gg_dm_b (Mitteldevon Basis, unvollständig)

Formationen:

- Emscher_Form_t (Emscher Formation Top, unvollständig)
- Emscher_Form_b (Emscher Formation Basis, unvollständig)
- Wealden_t (Wealden Top, unvollständig)
- Wealden_b (Wealden Basis, unvollständig)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 190 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Unterkreide wurde aus dem Landesmodell die Fläche „Kreide Basis (gg_kr_b)“ verwendet.

Das digitale Geländemodell für Nordrhein-Westfalen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_1500 m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 190, 1a – e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Unterkreide und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen der Emscher-Formation, der Oberkreide sowie der um 300 m u. GOK abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_1500 m u. GOK angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 190, 1f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300–1500 m u. GOK) eingehalten wurden. Des Weiteren wurde die Plausibilität der Bearbeitungsfläche Unterkreide anhand von 2D-Profilschnitte kontrolliert. Die Bearbeitungsfläche Unterkreide wurde mit der Verwaltungsgrenze VG250 verschnitten und auf Bereiche innerhalb Nordrhein-Westfalens beschränkt (Tabelle 190, 1g).

Die Bearbeitungsfläche Unterkreide wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 190, 1i).

2D-Bearbeitung

Alle verwendeten Informationen (Tabelle 190) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt. Die aus dem Geomodel extrahierten Flächen für Nordrhein-Westfalen, die eine Mindestmächtigkeit der Unterkreide von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK vorkommen, wurden zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wurde.

Auswertung der thematischen Karten

9. Alle oben beschriebenen Karten wurden vor der Auswertung falls nötig digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert.

Abgleich mit Bohrungsdaten

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten wurden auf den Tonanteil, die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation und die Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK innerhalb der Landesgrenzen von Nordrhein-Westfalen geprüft. Auch die durch den Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalens übermittelten Schichtenverzeichnisse wurden mit den ausgewiesenen Flächen verglichen.

Ein Abgleich der Bohrungen mit den Ergebnissen der Mächtigkeits- und Fazieskarten erfolgte in folgenden Schritten:

6. Einladen der Bohrungen (Hoth et al. 2007)
7. Im Falle der Landesbohrdatenbank: Abgleich der vorhandenen Schichtenverzeichnisse in Bezug auf Lithologie, Stratigraphie und Teufe mit den erzeugten Flächen.
8. Im Falle der Tonstudie: Abgleich des Tonanteils und der kumulativen Mächtigkeiten der Bohrungsdaten mit den erzeugten Flächen.

Bewertung der potentiellen Tongesteine aller Stufen:

Das geologische 3D-Modell deckt die gesamte Einheit der Unterkreide ab, sodass eine individuelle Analyse der einzelnen Stufen nicht erfolgen kann.

Ein Abgleich der Modellflächen mit der Verbreitungskarte der gesamten Unterkreide (Grabert 1998c; Mutterlose 2000a) bestätigt die ausgewiesenen Bereiche durch Überlagerung, weist jedoch auch zusätzliche Verbreitungsgebiete aus. Da auf Basis aller vorliegenden Bohrungsdaten keine Vorkommen von Tongesteinen der Unterkreide in diesen zusätzlichen Arealen bestätigt werden konnten, findet keine Erweiterung der existierenden Flächen statt.

Fazies- und Mächtigkeitskarten (Mutterlose 2000a) zeigen Vorkommen toniger Fazies, die die Mindestanforderungen erfüllen, in den ausgewiesenen Gebieten. Ebenfalls belegen Karten des Paläogeographischen Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa (Schott 1969), die NiKo-Studie der BGR (Ladage et al. 2016) sowie der „Geological Atlas of Western and Central Europe“ (Ziegler 1990) Übereinstimmungen mit den Flächen die aus der Auswertung des Landesmodelles des Geologischen Dienstes von Nordrhein-Westfalen resultieren.

Fazit

Krull et al. (2004) weisen zusätzliche Gebiete zu den extrahierten Flächen des 3D-Modells aus. Da diese Bereiche jedoch auf Grund der vorliegenden Datenbasis (Bohrungsdaten, Schichtenverzeichnisse, Studien sowie Fazies- und Mächtigkeitskarten) weder nachvollzogen noch verifiziert werden konnten, fand keine Flächenerweiterung statt.

Die Tonstudie (Hoth et al. 2007) analysiert lediglich eine Bohrung in Nordrhein-Westfalen (Rahden Z 1/1982), die jedoch einen adäquaten Tonanteil der Klasse 1a (Tonanteil überwiegend größer 80 %) aufweist.

Die überprüften, durch den Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalens übermittelten Schichtenverzeichnisse zu Bohrungen verifizieren die Verbreitung von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Flächen.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammensetzung und der Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

In Nordrhein-Westfalen wurde lediglich eine Bohrung der Tonstudie (Hoth et al. 2007) in Bezug auf den Tonanteil ausgewertet. Diese entspricht der Mindestanforderung der Tonanteilkategorie 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %). Die Schichtenverzeichnisse der durch den Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalens übermittelten Bohrungen zeigen zwar keine Tonanteile, jedoch die Verbreitung toniger Fazies in den ausgewiesenen Flächen (Kapitel 7). Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein der Unterkreide in Nordrhein-Westfalen **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit der Unterkreide wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten Unterkreide zusammen.

Die aus dem 3D-Modell hervorgegangenen Mächtigkeitsangaben wurden mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) überprüft und ausreichende Mächtigkeit von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Gebieten verifiziert.

Ein zusätzlicher Vergleich mit denen durch Krull et al. (2004) als „potenziell untersuchungswürdig“ eingestuften Gebieten bestätigte die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“.

Die durch den Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalens bereitgestellten Daten zu Verbreitungsgebieten von Tongesteinen, die das Mächtigkeitskriterium erfüllen, bestätigten ebenfalls die Erfüllung der Mächtigkeitsanforderung.

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Unterkreide wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Die aus dem 3D-Modell hervorgegangenen Tiefenangaben wurden mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) überprüft und ausreichende Mächtigkeit von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Gebieten verifiziert.

Ein Vergleich mit den durch den Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen bereitgestellten Tiefenangaben von Tongesteininformationen in Nordrhein-Westfalen bestätigte die Erfüllung der Mindestanforderung.

Die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u GOK“ wird daher als zunächst **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 87 ist das Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Einheit Unterkeide in Nordrhein-Westfalen dargestellt. Abbildung 88 und Abbildung 89 zeigen geologische Profile durch Nordrhein-Westfalen, welche die sich über der Unterkreide liegenden Einheiten widerspiegeln.

Eine Auflistung dieser auch als „Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen“ bezeichneten Ergebnisflächen ist in Tabelle 191 zu finden.

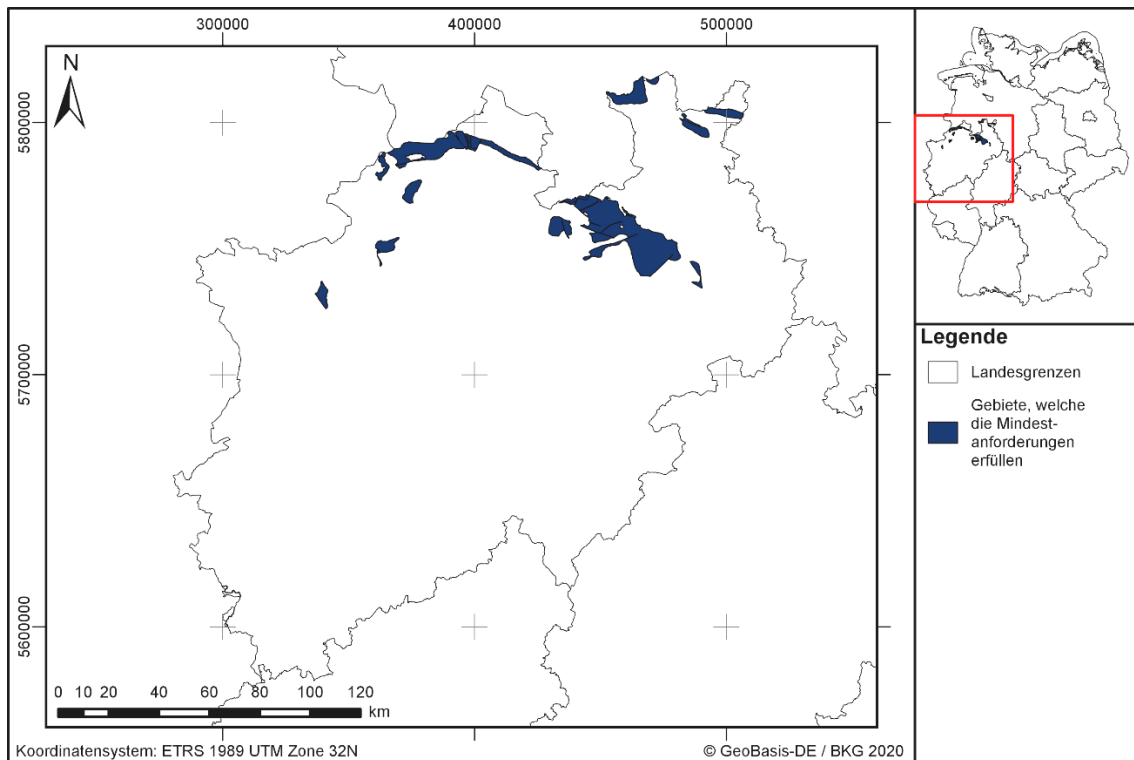


Abbildung 87: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Nordrhein-Westfalen. Die blauen Flächen zeigen die Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen.

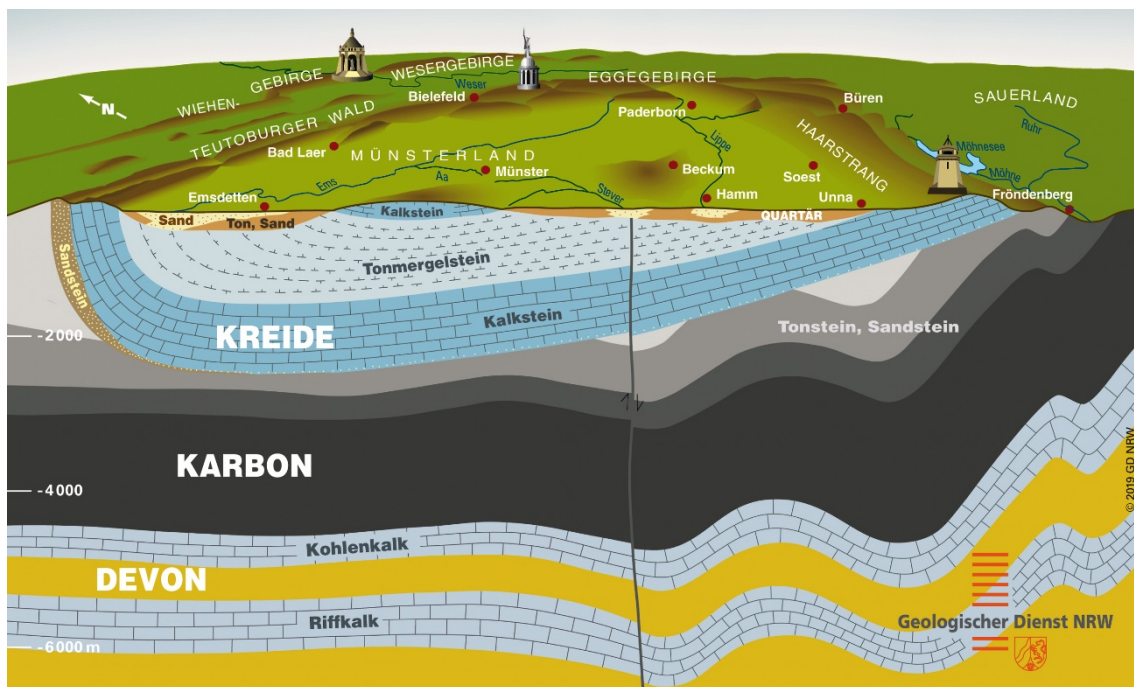


Abbildung 88: Vereinfachtes geologisches Profil durch die Münsterländer Kreidebucht (Geothermiezentrum Bochum 2019, bereitgestellt durch GD NRW 2019)

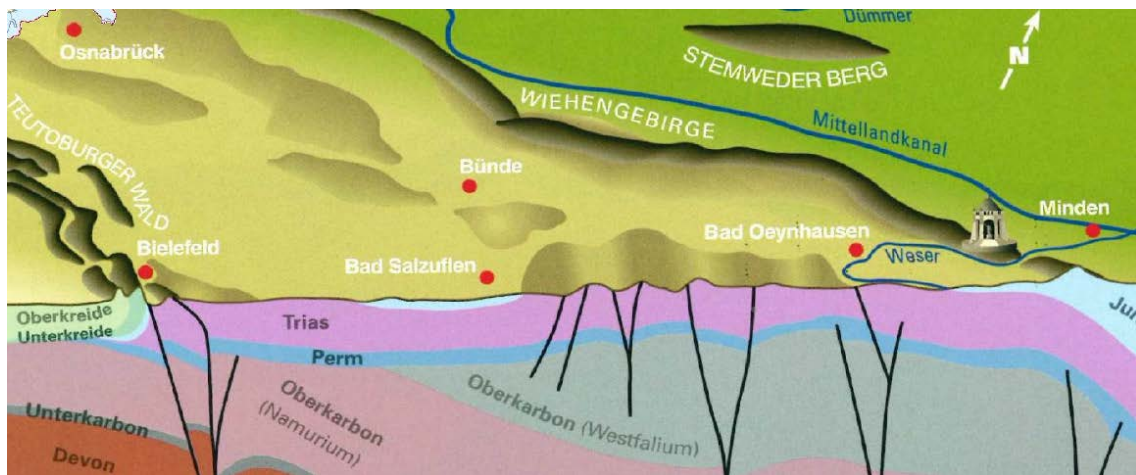


Abbildung 89: Vereinfachtes geologisches Profil durch das Norddeutsche Bergland/Wiehengebirgsvorland, modifiziert nach Schäfer (2016)

Tabelle 191: *Auflistung aller Gebiete in Nordrhein-Westfalen, die aus der Auswertung der Daten resultieren mit Angabe der Flächengrößen. Flächen, die kleiner sind als 10 km², befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.*

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
NRW_t_kru_1	8
NRW_t_kru_2	10
NRW_t_kru_3	16
NRW_t_kru_4	23
NRW_t_kru_5	27
NRW_t_kru_6	34
NRW_t_kru_7	35
NRW_t_kru_8	37
NRW_t_kru_9	38
NRW_t_kru_10	53
NRW_t_kru_11	78
NRW_t_kru_12	258
NRW_t_kru_13	559

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 192 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 192: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank*

DokID	Dateigruppen-ID	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11884574	8906	2385811	Norddeutschland_West.mdb	Schichtenverzeichnis Rahden Z 1/1982	Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007)

DokID	Datei- grup- pen-ID	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Da- tum aus der Datei	Beschreibung
11883267	8860	2384532	Schichten- verzeich- nisse.pdf	Waldhügel 1 Brechte 1 Solungsbohrung Epe S67 (ab- gelenkt) Solungsbohrung Epe S 80 Solungsbohrung EPE S 65 Solungsbohrung Epe S 62 (1990) Solungsbohrung Epe S 35 Solungsbohrung Epe S 72 (1997) Solungsbohrung Epe S 69	Analyisierte Schichtenver- zeichnisse zu Bohrungen aus der Bohr- datenbank NRW
11883267	8849		Landesmo- dell_NRW		3D-Landes- modell von NRW

1.3.26 Unterkreide – Mecklenburg-Vorpommern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG auf die Tongesteinsabfolgen der Unterkreide, die aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung die Aufgaben eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gemäß § 2 StandAG potentiell erfüllen können. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Mecklenburg-Vorpommern.

Die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie: Kreide, Unterkreide

Die Unterkreide ist in folgende Stufen untergliedert: Berriasium, Valanginium, Hauterivium, Barremium, Aptium, Albium. Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten der Unterkreide und deren lithologische Ausprägung sind der tabellarischen Übersicht Mecklenburg-Vorpommerns (Kapitel 5) zu entnehmen.

Das Berriasium stellt die stratigraphisch älteste Einheit der Unterkreide dar. Der jüngste Teil des Berriasium wird in Mecklenburg-Vorpommern durch die Fazies des Wealden dominiert. Alle Stufen sind in Mecklenburg-Vorpommern verbreitet. Mit Blick auf die Aufgaben des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und die damit an das Gestein bestehenden Eigenschaften kommen in Mecklenburg-Vorpommern für die Prüfung der Mindestanforderungen im Sinne der Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) das Berriasium (Ober-Berriasium), Valanginium, Hauterivium und Aptium in Betracht.

Geographische Verbreitung

Nördliches Zentrum (Beckenzentrum) Südwest-Mecklenburg, Priegnitz und die Nordost-Altmark

In der gesamten Unterkreide sind in Mecklenburg-Vorpommern zwei voneinander durch die Pompecksche Schwelle bzw. die Nordmecklenburg-Schwelle und das Ostbrandenburgische Hebungsgebiet getrennte Sedimentationsgebiete vertreten: 1) der nordöstliche Teil der Prignitz-Altmark-Brandenburg-Senke, die die östliche Fortsetzung des Niedersächsischen Beckens bildet (im Südwesten Mecklenburg-Vorpommerns) und 2) die Usedom-Senke im Randbereich der Dänisch-Polnischen Senke (im Nordosten Mecklenburg-Vorpommerns) (Diener et al. 2004). In der Usedom-Senke sind keine potentiellen Tongesteine zu erwarten (siehe Kapitel 5).

Fazies-/Ablagerungsraum

Die Unterkreide in Mecklenburg-Vorpommern ist durch das Auftreten von Transgressionszyklen im Bereich der Westeuropäischen Senke geprägt, die durch Einengungs- und Verlandungsperioden getrennt sind. Der Übergang zwischen Oberjura und Unterkreide ist durch einen Rückzug des Meeres (Regression) identifizierbar - gefolgt von einer ersten großen Transgression und Beckenerweiterung im Valanginium (Katzung 2004a). Dies führt zu einer Veränderung der abgelagerten Sedimente von toniger zu gröberer klastischer Fazies. Die zweite weitläufige, im gesamten Zentraleuropäischen Becken auftretende Beckenveränderung fand im Mittleren Albium durch die Alb-Transgression statt.

Im Laufe der Unterkreide entwickelten sich die Prignitz-Altmark-Brandenburg-Senke und die Usedom-Senke unterschiedlich (Diener et al. 2004). Tonig-mergelige Sedimente bilden nahezu vollständige Abfolgen im Südwesten Mecklenburg-Vorpommerns, wohingegen der nordöstliche Teil durch stratigraphische Schichtlücken und stark sandige Fazies geprägt ist (Diener et al. 2004).

Lithologie (Diener 2000b; Hiß 2000; Franke 2020)

Die einzelnen Stufen der Unterkreide lassen sich lithologisch wie folgt kurz beschreiben:

- Berriasium:
 - o Unter-Berriasium: Ton-, Schluff-, Sand- und Mergelsteine
 - o Ober-Berriasium Ton-, Schluff- und Sandsteine
 - o Vereinzelte Kohlelagen
- Valanginium: Ton-, Schluff- und Sandsteine
- Hauterivium: Ton-, Mergel-, Schluff- und Sandsteine
- Barremium: Feinklastika wie Mergel-, Schluff- und Tonsteine
- Aptium: Mergel- und Tonsteine
- Albium: Mergel- und Tonmergelsteinen

Mächtigkeit (Diener 2000b; Hiß 2000; Franke 2020)

Nachfolgende Mächtigkeiten sind für die einzelnen Stufen der Unterkreide im Untersuchungsgebiet heranzuziehen:

- Berriasium: Gesamtmächtigkeit bis zu 340 m
- Valanginium: Gesamtmächtigkeit bis zu 80 m
- Hauterivium: Gesamtmächtigkeit bis zu 230 m
- Barremium: Gesamtmächtigkeit bis zu 80 m
- Aptium: Gesamtmächtigkeit bis zu 50 m
- Albium: stark variable Gesamtmächtigkeit; durchschnittlich 30 m bis 140 m (max. 220 m)

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 193). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 193: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Be-hörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/7728	*.shp	Verwaltungsgebiete (VG25)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BGR	11844870_01/6846	*.pdf	BGR_Tonstudie2007	Studie der BGR (Hoth et al. 2007)
3	DE	BGR	11888776/9164	*.mdb	LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06.mdb	Bohrdatenbank
4	DE	BGR	11897915/9564	*.pdf	Krull_etal_2004_Pot_Wirtsgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
5	DE	BGR	11897915/9566	*.tif	Anlagen_Krull_etal_2004_Pot_Wirtsgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
6	DE	BGR	11884574/8906	*.mdb	Norddeutschland_Ost.mdb	Bohrdatenbank der Studie von (Hoth et al. 2007)

Nr.	Bundesland	Be-hörde	DokID/ Datei-gruppe	Daten-format	Dateiname	Beschreibung
7	DE	BGR	11844870/6834	*.shp	NiKo_kruBlaettertone_Verbreitung0m_V1_poly.shp	Studie der BGR (Ladage et al. 2016)
8	DE	BGE	11894617/9253	*.xlsx	2020_04_08_Übergabe_TEK_GI_Zusätzliche_Bohrungen_nach Abgleich_MA	Bohrungsdaten
9	DE	BGR	11867242/7206	*.shp	150_kru_iso.shp ch11_lcr_t	Tiefen- und Mächtigkeitsangaben der Unterkreidebasis des Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (Doornenbal & Stevenson 2010)

Eigenrecherche

Allgemeine Literatur

Eine wichtige Grundlage bildet die „Lithologie und Paläogeographie des Mesozoikums in der DDR – Bericht MM-23/73“ des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973). Unterstützend finden Kapitel der „Geologie von Mecklenburg-Vorpommern“ (Katzung 2004a) sowie „Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland“ (Hiß 2000) Berücksichtigung bei der Datenakquise und -auswertung. Die „Tonstudie der BGR“ (Hoth et al. 2007) wurde ebenfalls als Datenquelle genutzt.

Thematische Karten

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

- Katzung (2004b): Regionalgeologische Stellung und Entwicklung. In: Katzung, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, Germany, 2004.
 7. Verbreitungskarte der prä-albischen Unterkreide und Unterkreide-Schollen im Pleistozän
- Hiß & Schönfeld (2000): Regionale Verbreitung und Faziesräume in der Bundesrepublik. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Redaktion: M. Hiß & J. Mutterlose) (2000): Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland. – Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, 226: 186 S., 68 Abb.,

24 Tab.; Frankfurt a. M., <http://www.schweizerbart.de/pubs/isbn/sng/cfs-courie-3510610474-desc.html>

1. Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Unterkreide (ohne transgressives Mittel- bis Ober-Albium) in Ostdeutschland
- Ziegler (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. 130 pp. folder with 40 maps or charts. The Hague: Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.
 1. Aptian-Albian Paleogeography
 2. Berriasian-Valanginian Paleogeography
 3. Hauterivian-Barremian Paleogeography
 - Zentrales Geologisches Institut Berlin (Diener 1973) (Mächtigkeitkarten)
 1. Verbreitung der Unterkreide (Wealden bis Alb)
 2. Wealden/Valanginium
 3. Hauterivium
 4. Barremium/Unteralbium
 5. Mittel bis Oberalbium
 - Zentrales Geologisches Institut Berlin (Diener 1973) (Fazieskarten)
 1. Übersichtsdarstellung der Ausbildung des Barrême bis Unteralb
 2. Übersichtsdarstellung der Ausbildung des Hauterive
 3. Beckenerweiterung im Mittel- und Oberalb
 4. Beckenerweiterung im Wealden und Valangin

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Unterkreide in Mecklenburg-Vorpommern geprüft wurde, ist in Tabelle 194 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 194: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Analyse der verfügbaren Literaturangaben	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
2. Digitalisierung von 2D geologischen Informationen (Tongesteinsvorkommen und Mächtigkeit)	
a) Erstellen des ArcGIS Projekts	Tongestein_Unterkreide_gesamt_MaGi.aprx
a) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitung der tonigen Fazies der Fazieskarten (Diener 1973; Hiß 2000) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten	DDR_Barreme_Unteralb_tonige_Fazies.shp DDR_Hauterive_tonige_Fazies.shp DDR_Wealden_Valangin_tonige_Fazies.shp Verbreitung_prä_mittelalb_MV_Strat_Komm.shp
b) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Mächtigkeitskarten (Diener 1973) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten sowie der gesamten Unterkreide	DDR_Mächtigkeit_krU_Mittel_Oberalb_gr100mthickness.shp DDR_Mächtigkeit_Wealden_Valangin_gr100m.shp DDR_Mächtigkeit_krU_Hauterive_gr100.shp Mächtigkeit_kru_gr_100m_MV_DDR.shp
c) Verschnitt der erstellten Fazies- und Mächtigkeitspolygone aus 2.b) und 2.c)	MG_Barreme_Unteralb.shp MG_Hauterive.shp MG_Wealden_Valangin.shp Mittelalb_Oberalb_Intersect.shp MG_Wealden_Hauterive_Barreme_Unteralb.shp
d) Alle Bohrungen aus der Bohrdatenbank des LUNG plotten und die Schichtenverzeichnisse auf Vorhandensein toniger Unterkreidefazies sowie deren Mächtigkeit und Tiefenlage prüfen.	
e) Alle Bohrungen aus der Tonstudie (Hoth et al. 2007) plotten und nach kumulativer Mächtigkeit und Tongehalt auswerten.	Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx
3. Plausibilitätsprüfung der ausgewiesenen Flächen und gegebenenfalls Erweiterung oder Reduktion der Areale	
a) Verifizierung der Tiefenlage der Unterkreidebasis der ausgewiesenen Flächen (Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area, Doornenbal & Stevenson 2010)	SPBA_Depth_Lower_Cretaceous.lpkx

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Vergleich der in der Tonstudie von Krull et al. (2004) ausgewiesenen Gebiete mit den durch die BGE ausgewiesenen Gebieten	Krull_potentiell_untersuchungswürdig.shp Krull_untersuchungswürdig.shp Wirth_Tongestein_Mächtigkeit_gr100_MV.shp Wirth_Tongestein_Top300bis1500_MV.shp
c) Auswertung und Vergleich mit der Blättertonverbreitung der NiKo-Studie (Ladage et al. 2016)	NiKo_kruBlaettertone_MV.shp
d) Abgleich mit Bohrungsdaten, die außerhalb der ausgewiesenen Fläche liegen	Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx
4. Finale Ausweisung des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes. Nach positiv erfolgter Prüfung 3. konnten die zuvor ausgewiesenen Areale als finale Gebiete übernommen werden	Mindestanforderungsgebiet_MV.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern steht für Tongesteine der Unterkreide kein Geomodell zur Verfügung, sodass die Anwendung der Mindestanforderungen ausschließlich auf Basis thematischer Karten, Bohrungen und Literaturangaben erfolgte.

2D-Bearbeitung

Kartenmaterial

Alle in den Eingangsdaten beschriebenen Karten wurden vor der Auswertung, falls nötig, digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert (Tabelle 194, 2b und 2c).

Besonderheiten in der Auswertung der thematischen Karten:

- Das Kartenmaterial des ZGI Berlin (Diener 1973) und der (Hiß 2000) wurde im Hinblick auf die Verbreitung und Mächtigkeit von tonigen Formationen der stratigraphischen Einheiten Wealden (Berriasium) und Valanginium, Hauterivium und Barremium bis Unteralbium digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert. Der Wealden (Berriasium) und das Valanginium wurde dabei zusammen dargestellt, da der allgemeine Aufbau und die Biostratigraphie für beide stratigraphische Einheiten schwer zu unterscheiden sind (Diener 1973). Es existiert keine genauere Differenzierung zwischen dem Barremium, Aptium und Unteralbium.
- Das Kartenmaterial des ZGI Berlin (Diener 1973), das Isolinien der Gesamtmächtigkeit der Unterkreide beinhaltet, wurde ebenfalls digitalisiert und georeferenziert. Die anschließende Vektorisierung erfolgte auf Grund teils fehlender Anga-

ben zu sekundären Mächtigkeiten lediglich basierend auf primären Mächtigkeiten. Der daraus resultierende Unsicherheitsfaktor der potentiellen Reduktion der Mächtigkeit zum Zeitpunkt der Ablagerung z. B. durch Erosion muss in der Mächtigkeitsanalyse betrachtet werden. Bohrungsdaten und Schichtenverzeichnisse wurden als Referenzdatensätze zur Überprüfung der Repräsentativität der ausgewerteten Mächtigkeitskarten herangezogen.

- Verschneiden der Ergebnisse der Mächtigkeitskarten mit denen der Fazieskarten: Ein Verschnitt zwischen den auf den Karten des ZGI Berlin (Diener 1973) basierenden Polygonen der Verbreitung der tonigen Fazies und denen, die eine Mindestmächtigkeit größer als oder gleich 100 m der gesamten Unterkreide aufweisen, wurde unter Zuhilfenahme des ArcGIS Pro-Tools „Überschneiden“ durchgeführt um die Mindestanforderungen Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit anzuwenden (Tabelle 194, 2d).

Abgleich mit Bohrungsdaten

Das geologische Landesamt von Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) hat Bohrungsdaten in Form einer Datenbank geliefert (LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06.mdb, DokID: 11888776/9164). Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden zur Qualitätssicherung geprüft (Tabelle 194, 2e).

Zusätzlich wurden die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten auf den Tonanteil, die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation und die Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK innerhalb der Landesgrenzen von Mecklenburg-Vorpommern geprüft (Tabelle 194, 2f).

Ein Abgleich der Bohrungen mit den Ergebnissen der Mächtigkeits- und Fazieskarten erfolgte in folgenden Schritten:

- Einladen der Bohrungen (LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06.mdb und Norddeutschland_Ost.mdb (Hoth et al. 2007), siehe Tabelle 193)
- Im Falle der Landesbohrdatenbank: Abgleich der mit den Bohrungsdaten übermittelten Schichtenverzeichnisse mit den erzeugten Flächen.
- Im Falle der Tonstudie: Abgleich des Tonanteils und der kumulativen Mächtigkeiten der Bohrungsdaten mit den erzeugten Flächen.

Bewertung der potentiell geeigneten Tongesteine aller Stufen

Basierend auf den oben beschriebenen digitalisierten thematischen Karten und Bohrungsdaten wurden alle Stufen der Unterkreide separat im Hinblick auf ihre Eignung als Tongestein, das die Aufgaben des ewG übernehmen kann, bewertet.

Berriasium und Valanginium

Eine heterogene Verteilung des Tonanteils innerhalb dieses Gebietes wird durch verschiedene Tonanteile der untersuchten Bohrungen belegt (Hoth et al. 2007). Das ZGI

Berlin (Diener 1973) dokumentiert dies in Südwestmecklenburg mit einer Untergliederung des Berriasiums (Wealden) in eine untere, vorwiegend sandige, eine mittlere, vorwiegend tonige und eine obere, vorwiegend sandige Folge (Diener 1973). Die Heterogenität des Tonanteils führt jedoch nicht zum Ausschluss des Berriasiums und Valanginiums als tongesteinsenthaltene stratigraphische Einheiten.

Hauterivium

Die tonige Fazies ist in Mecklenburg-Vorpommern verbreitet und wird somit in die weitere Auswertung miteinbezogen.

Barremium und Aptium

Die Verbreitung der tonigen Fazies ist in den stratigraphischen Einheiten Barremium und Aptium auf Südwest-Mecklenburg-Vorpommern beschränkt. Wurden die Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) mit dem erstellten Polygon korreliert, so wurde dies durch nachgewiesene, adäquate und endlagerrelevante Tonanteile (Tonanteil-Klasse 1a, überwiegend größer als oder gleich 80 % Tonanteil) bestätigt.

Mittelalbbium bis Oberalbbium

Im Ostteil der Norddeutschen Senke bestehen die mittel- bis oberalbbischen Sedimentgesteine – abgesehen von den grobklastischen Transgressionsbereichen – hauptsächlich aus einer tonig-kalkigen Fazies (Diener 1973). Die Karbonatgehalte der Mergel variieren dabei stark zwischen 50 % bis 60 % in Nordmecklenburg mit südwärtiger kontinuierlicher Abnahme, zwischen 40 % bis 50 % in Nordbrandenburg und Südmecklenburg und zwischen 30 % bis 40 % in der nördlichen Altmark (Diener 1973). Tondominierte Vertreter der Kalk-Mergel-Ton Mischreihe werden ebenfalls als potentielles Tongestein in Betracht gezogen. Die teils sehr hohen Karbonatgehalte der im Norden Mecklenburg-Vorpommerns auftretenden Sedimentgesteine reduzieren die Barrierewirksamkeit und werden als nicht endlagergeeignet eingeschätzt.

Die stratigraphischen Einheiten Mittelalbbium und Oberalbbium erfüllen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht die geforderten Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit. Daher werden in der weiteren Prüfung der Mindestanforderungskriterien lediglich das Berriasium/Valanginium, Hauterivium und Barremium bis Unteralbbium im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern als endlagerrelevante stratigraphische Einheiten der Unterkreide in Betracht gezogen.

Fazit

Die durch das ZGI Berlin (Diener 1973) bereitgestellte Isolinienkarte der Unterkreide weist im Vergleich zu den ausgewiesenen Flächen noch weitere aus, die primäre Mächtigkeiten größer als oder gleich 100 m aufweisen. Eine Berücksichtigung ausgewählter, durch das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) übermittelten Bohrungsdaten sowie der darin enthaltenen Schichtenverzeichnisse, zeigen jedoch deutlich, dass in den zusätzlichen Flächen entweder keine Unter-

kreide im Untergrund durch die Bohrung angetroffen wurde oder tonige Fazies der Unterkreide zwar vorhanden ist, aber nicht der Mächtigkeitsanforderung (t größer als oder gleich 100 m) entspricht. Eine stichprobenhafte Verifizierung des ausgewiesenen Gebietes wurde ebenfalls auf Basis der übersandten Bohrdatenbank durchgeführt.

Es ist deutlich erkennbar, dass Krull et al. (2004) eine weitaus größere Fläche ausweisen als die erstellten Flächen. Werden jedoch die Schichtenverzeichnisse der Bohrdatenbank des LUNG sowie die Bohrungsdaten der Tonstudie selbst in Betracht gezogen, so ist klar erkennbar, dass teilweise Bohrungen mit adäquatem Tonanteil in den zusätzlichen Flächen liegen, jedoch die Mächtigkeitsanforderung nicht erfüllt wird und teilweise keine Bohrungen existieren, die eine Erweiterung der ausgewiesenen Flächen rechtfertigen würden. Aus diesem Grund fand keine Vergrößerung der die Mindestanforderungen erfüllenden Gebiete statt.

Auch ein Vergleich mit der paläogeographischen Karte der Stratigraphischen Kommission Deutschlands (Hiß 2000) und Katzung (2004a) sowie den darin angegebenen Mächtigkeiten der in den Bohrungen angetroffenen Unterkreideeinheiten stützen die Ausweisung der erstellten Gebiete. Es ist eine Abnahme der Mächtigkeit der Unterkreide von Südwesten Mecklenburg-Vorpommerns nach Nordosten zu verzeichnen, was sich auch in der Zunahme der sandigen Fazies in gleicher Richtung widerspiegelt (Hoth et al. 2007).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammensetzung und der Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Mit Hilfe der lithologisch-paläogeographischen Karten des ZGI Berlin (Diener 1973) konnten tonige Faziesbereiche im Südwesten von Mecklenburg-Vorpommern identifiziert werden. Bohrungsdaten der Tonstudie (z. B. Bohrung Ludwigslust 1/57) bestätigen das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit einem adäquaten Tonanteil (Hoth et al. 2007).

Tabelle 195: Übersicht über Bohrungen der Tonstudie der Tonanteilsklasse 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) in den Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen

Object-ID	LOCID	Long Name
288	468	Dömitz 5/60
354	468	Dömitz 5/60
281	367	Conow-Ludwigslust 2/72
345	367	Conow-Ludwigslust 2/72
283	369	Gorlosen 2 /56
282	368	Gorlosen 12 /71
277	347	Hagenow 1 /65
341	347	Hagenow 1 /65
198	341	Ludwigslust 1 /57
276	341	Ludwigslust 1 /57
340	341	Ludwigslust 1 /57
505	342	Neustadt-Glewe 1 /88
483	145	Marnitz-West 1/1a/59

Eine weitere Vergleichsdatenquelle bildet die NiKo-Studie (Ladage et al. 2016), die das Verbreitungsgebiet der Blättertone der stratigraphischen Einheit Barremium analysiert. Eine Überlappung der ausgewiesenen Fläche mit den Polygonen der NiKo-Studie verifiziert das Auftreten dieser tonigen Fazies im Untersuchungsgebiet. Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein der Unterkreide in Mecklenburg-Vorpommern **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Für die Prüfung der Mindestanforderung Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs stellen Mächtigkeitsinformationen aus den lithologisch-paläogeographischen Karten der DDR (Diener 1973) eine fundierte Datengrundlage dar. In den ausgewiesenen Flächen ist die vorliegenden Mächtigkeit der Unterkreide größer als 100 m.

Für alle Gebiete wurden zwecks Verifizierung der ausgewiesenen Gebiete zusätzlich Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbanken aus Mecklenburg-Vorpommern hinsichtlich der Tongesteinsmächtigkeit überprüft. Lediglich die Bohrung Ludwigslust 1/57 weist eine Abfolge von über 100 m Tongestein der Unterkreide auf. Weitere Bohrungen der Bohrungsdatenbank des Landesamtes (z. B. „EGrawL11_1956“ und „EGrs3_1956“) erfüllen die Mindestanforderung „Mächtigkeit“. Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Für alle Gebiete, wurden Schichtenverzeichnisse der gelieferten Bohrungsdatenbanken von Mecklenburg-Vorpommern sowie der Studie von Hoth et al. (2007) hinsichtlich der Tiefenlage der Unterkreide geprüft.

Da innerhalb der ausgewiesenen Mindestanforderungsgebiete Bohrungen der Bohrungsdatenbank des Landesamtes (z. B. „EGrawLI1_1956“ und „EGrs3_1956“, Kapitel 7) Tongesteine der Unterkreide in Teufen zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK aufweisen, wird die Erfüllung der Mindestanforderung „Tiefenlage des einflusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

Mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) erfolgte eine weitere Überprüfung der Mindestanforderung Tiefenlage. Diese ergab, dass die Tiefenlage der Unterkreidebasis in den ausgewiesenen Gebieten zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK liegt, sollten Z-Werte existieren.

Die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m unter GOK“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 90 ist das Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Einheit Unterkreide in Mecklenburg-Vorpommern und in Abbildung 91 ein geologisches Profil durch Mecklenburg-Vorpommern dargestellt, welches die sich über der Unterkreide liegenden Einheiten widerspiegelt.

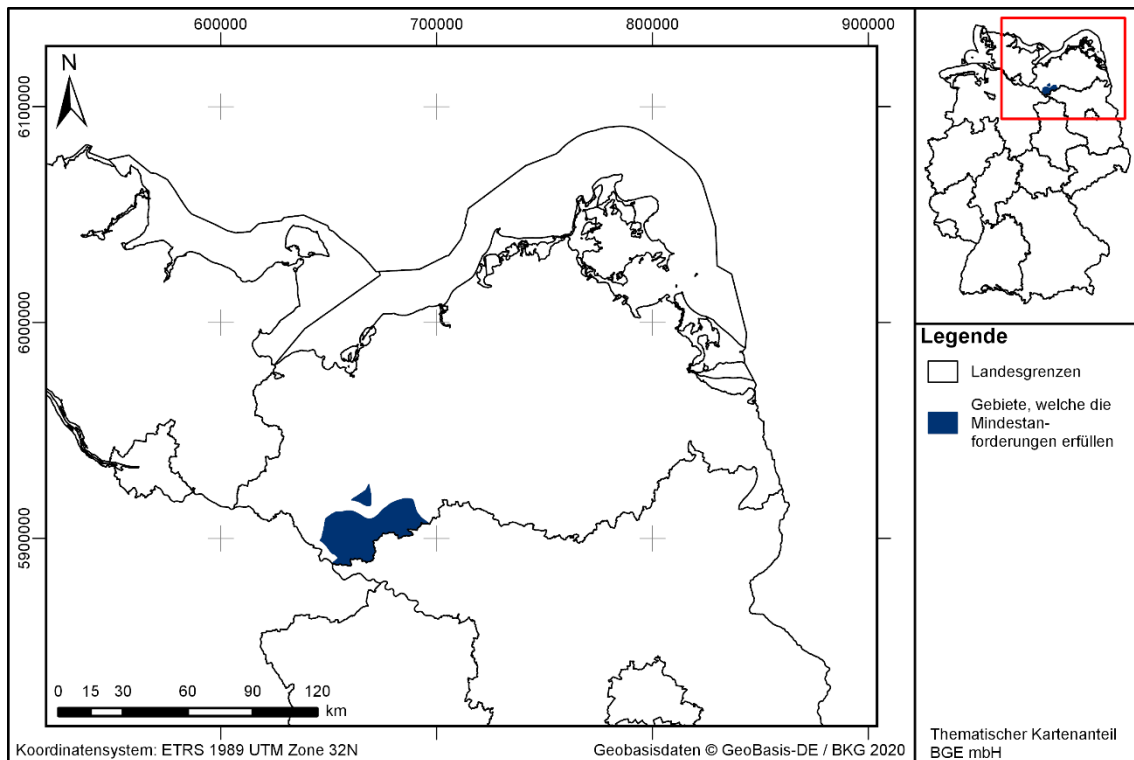


Abbildung 90: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen

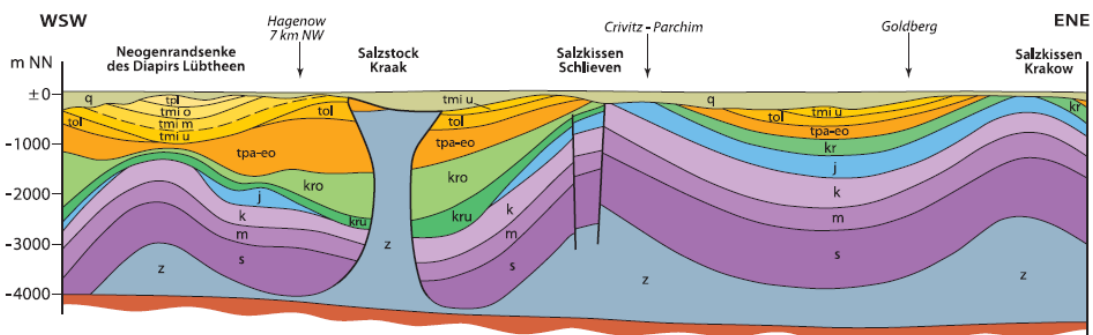


Abbildung 91: Geologischer Schnitt durch verschiedene Zechstein-Salzstrukturen (z) in Südwest-Mecklenburg (Müller & Obst 2008)

Eine Auflistung dieser auch als „Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen“ bezeichneten Ergebnisflächen ist in Tabelle 196 zu finden.

Tabelle 196: Auflistung aller Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, der Unterkreide in Mecklenburg-Vorpommern mit Flächenangaben

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MV_t_kru_1	41
MV_t_kru_2	781

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 197 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 197: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei- ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
118887 76	9164	24540 84	LUNG_SVZ_ Kurz_2020_0 2_06.mdb	Schichtenverzeichnisse: E Grabow 1/1956 E Gorlosen 3/1956	Verwendete Bohrungen und Schichtenverzeichnisse aus der Bohrdatenbank des LUNG
118845 74	8906	23858 10	Norddeutsch- land_Ost.mdb	Schichtenverzeichnisse Dömitz 5/60 Conow-Ludwigslust 2/72 Gorlosen 2 /56 Gorlosen 12 /71 Hagenow 1 /65 Ludwigslust 1 /57 Neustadt-Glewe 1 /88 Marnitz-West 1/1a/59	Bohrdatenbank Tonstudie; entscheidungserheblich: Tonanteilsklasse & kumulative Mächtigkeit (Hoth et al. 2007)

Entscheidungserhebliche Daten aus Eigenrecherche

Hiß_2000_Verbreitung der prä-mittelalibischen Unterkreide: Paläogeographische Karte der gesamten prä-mittelalibischen Verbreitung der Unterkreidefazies in Deutschland; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen der prä-mittelalibischen Unterkreide (Hiß 2000)

Geological Atlas_1990_Hauterivian-Barremian: Paläogeographische Karten des Geological Atlas of Central and Western Europe; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen des Hauterivium und Barremium (Ziegler 1990)

Geological Atlas_1990_Berriasian-Valanginian: Paläogeographische Karten des Geological Atlas of Central and Western Europe; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen des Berriasium und Valanginium (Ziegler 1990)

Geological Atlas_1990_Aptian-Albian: Paläogeographische Karten des Geological Atlas of Central and Western Europe; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen des Aptiums und Albium (Ziegler 1990)

- ZGI (1979) UK_Wealden_Valangin: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Isolinien der Unterkreidemächtigkeiten größer als oder gleich 100 m im Berriasium (Wealden) und Valanginium (Diener 1973)
- ZGI (1979) UK_Mittel-OberAlb: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Isolinien der Unterkreidemächtigkeiten größer als oder gleich 100 m im Mittel-Oberalium (Diener 1973)
- ZGI (1979) UK_Hauterive: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Isolinien der Unterkreidemächtigkeiten größer als oder gleich 100 m im Hauterivium (Diener 1973)
- ZGI (1979) UK_Barreme_UnterAlb: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Isolinien der Unterkreidemächtigkeiten größer als oder gleich 100 m im Barremium bis Unterlialium (Diener 1973)
- DDR_Wealden_Valangin II_ZGI_1973: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen der tonigen Fazies im Berriasium (Wealden) und Valanginium (Diener 1973)
- DDR_Mittelalb_Oberalb_ZGI_1973: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen der tonigen Fazies im Mittel- und Oberlialium (Diener 1973)
- DDR_Hauterive_ZGI_1973: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen der tonigen Fazies im Hauterivium (Diener 1973)
- DDR_Barreme_Unteralb_ZGI_1973: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen der tonigen Fazies im Berremium bis Unterlialium (Diener 1973)

1.3.27 Unterkreide – Sachsen-Anhalt

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG auf die Tongesteinsabfolgen der Unterkreide, die aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten können. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Sachsen-Anhalt.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgte nach § 23 StandAG mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Sachsen-Anhalt, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Kreide, Unterkreide

Die Unterkreide ist in folgende Stufen untergliedert: Berriasium, Valanginium, Hauterivium, Barremium, Aptium, Albium. Eine Übersicht über die stratigraphischen Einheiten der Unterkreide und deren lithologische Ausprägung sind der tabellarischen Übersicht Sachsen-Anhalts (Kapitel 5) zu entnehmen.

Die Abgrenzung zum stratigraphisch älteren Jura erfolgt in Sachsen-Anhalt durch den Wealden (Bückerburg-Formation), der jüngsten Einheit der Unterkreide (Stottmeister et al. 2008). Alle Stufen sind in Sachsen-Anhalt vertreten – wenn auch teils nur regional oder lokal. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) wird in Sachsen-Anhalt das Berriasium (Ober-Berriasium), Valanginium, Hauterivium, Barremium, Aptium und Albium betrachtet.

Geographische Verbreitung

Prignitz-Altmark-Westbrandenburg-Senke (östliche Fortsetzung des Niedersächsischen Beckens), Subherzynische Kreidebucht (Südost-Fortsetzung des Niedersächsischen Beckens)

In der gesamten Unterkreide sind in Sachsen-Anhalt innerhalb der Prignitz-Altmark-Westbrandenburg-Senke drei Hauptverbreitungsgebiete vertreten (Altmark-Fläming-Scholle): 1. Nördliche Altmark, 2. Südliche Altmark, 3. Westliche Altmark. Zusätzlich bildet die Subherzynische Kreidebucht am nördlichen Harzrand (Halberstad-Blankenburg-Scholle) einen weiteren wichtigen Verbreitungsraum der Unterkreide; die Eignung der dortigen Lithologien, die Mindestanforderungen erfüllen können, ist jedoch fraglich. Da alle Stufen der Unterkreide von Tongestein dominiert werden, wird die Unterkreide im folgenden als gesamte Einheit betrachtet.

Fazies-/Ablagerungsraum (Stottmeister et al. 2008; Karpe 2008)

Der Sedimentationsraum in Sachsen-Anhalt ist sowohl durch Transgressions- und Regressionszyklen als auch durch halokinetische Vorgänge stark geprägt. Das Ablagerungsmilieu variierte lokal im Laufe der Unterkreide, ist jedoch als überwiegend marin einzustufen.

- Berriasium (Wealden)/Valanginium:
 - o Lückenhafte Verbreitung – Schichtlücken: kein Vorkommen in der Subherzynischen Kreidemulde
 - o Berriasium (Wealden): limnisch-brackisch dominiertes Milieu
 - o Valanginium: marines Milieu mit extensiver Emersion am Ende des Valanginiums
- Hauterivium:
 - o Hauptverbreitungsgebiet: Prignitz-Altmark-Westbrandenburg-Senke: nördliche Altmark, südliche Altmark (flachmariner Sedimentationsraum)
 - o Geringe Verbreitung in der Subherzynischen Kreidebucht (flachmarin-terrestrisches Milieu)
- Barremium, Aptium, Unteralbium
 - o Flachmariner Sedimentationsbereich
 - o Hauptverbreitungsgebiete: nördliche Altmark, südliche Altmark (nur in Randzonen von Störungen), westliche Altmark (Schichtlücken), Subherzynische Kreidemulde (flachmarin-terrestrisches Milieu)
- Mittel- bis Oberalbium:

- Hauptverbreitungsgebiet der tonigen, flachmarinen Fazies: Altmark; südliche Altmark (Verbreitung auf Randbereiche von Störungszonen beschränkt), Subherzynische Kreidebucht

Lithologie (Stottmeister et al. 2008; Karpe 2008)

Die einzelnen Stufen der Unterkreide lassen sich lithologisch wie folgt kurz beschreiben:

- Berriasium (Wealden)/Valanginium:
 - Wechsellagerung zwischen Sand-, Silt- und Tonsteinschichten mit kohligen Pflanzeneinlagerungen
- Hauterivium:
 - Nördliche Altmark: sandige Kalksteine, Tonsteine, Mergelsteine, kalkige Sandsteine
 - Südliche Altmark: Transgressionskonglomerat, Tonsteine, Kalksteine, (kalkhaltige) Sandsteine
 - Subherzynische Kreidemulde: Tonsteine und Mergelsteine mit Trümmererzen
- Barremium, Aptium, Unteralbium:
 - Altmark: Sandsteine, Siltsteine, (Ton-) Mergelsteine, sandige, glaukonitische Tonsteine; unterstes Aptium: Fischeschiefer
 - Subherzynische Kreidemulde: Barremium & Aptium: Tonsteine und Mergelsteine mit Trümmererzen; hauptsächlich Sandsteine, geringere Verbreitung von Konglomeraten und tonig-sandigen Sedimenten
- Mittel-Oberalbium:
 - Basis: geringmächtiges sandiges Transgressionskonglomerat
 - Altmark: Mergelsteine mit durchschnittlichem Kalkgehalt von 40 %
 - Südliche Altmark: Sandsteine
 - Subherzynische Kreidebucht: Minimuston (fossilreicher glaukonitischer Tonmergel), Flammenmergel (Mergel mit erhöhtem Kalkgehalt und kieselensäurehaltigen Fasern)

Mächtigkeit

Nachfolgende Mächtigkeiten sind für die einzelnen Stufen der Unterkreide im Untersuchungsgebiet heranzuziehen:

- Berriasium: Gesamtmächtigkeit größer 800 m
- Valanginium: Gesamtmächtigkeit bis zu 80 m

- Hauterivium: stark variable Gesamtmächtigkeit; durchschnittlich 100 m; bis zu größer als oder gleich 200 m in Randmulden (z. B. Messdorf)
- Barremium: Gesamtmächtigkeit bis zu größer als oder gleich 240 m
- Aptium: Gesamtmächtigkeit bis zu 60 m
- Albium: Gesamtmächtigkeit bis zu 120 m

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 198). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Basierend auf der Expertise der Geologischen Landesaufnahme wurden vom Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) basierend auf verfügbaren regionalen Karten eine Auswertung hinsichtlich ihrer lithologischen Beschreibungen in Kombination mit den in den Karten enthaltenen Mächtigkeitsinformationen vorgenommen. Für diejenigen Bereiche, in denen für die bearbeiteten Abfolgen die Mindestanforderungen hinsichtlich der Mächtigkeit (größer 100 m) erfüllt sind, wurde zusätzlich, soweit verfügbar, auf Basis des regionalen Kartenwerkes der Reflexionsseismik und Bohrungen eine Abschätzung der Tiefenlage vorgenommen. Diese Gebiete wurden vom LAGB als Kartendarstellungen im ArcGIS lesbaren Format bereitgestellt und somit zur Anwendung vorgeschlagen. Unter Berücksichtigung der übermittelten Ergebnisse wurden die Prüfung der Mindestanforderungen der Abfolge der Unterkreide vorgenommen.

Tabelle 198: Auflistung verwendeter Eingangsdaten.

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ GruppenID; Geschäftszeichen BGE	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/7 728	*.shp	Verwaltungsgebiete (VG25)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BGE	11902999/9 870	ts/pl	ST_SKUA_Export	SPBA-3D für Sachsen-Anhalt
3	DE	BKG	11865482/8 853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell
4	DE	BGR	11844870_0 1/6846	*.pdf	BGR_Tonstudie2007	Studie der BGR (Hoth et al. 2007)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ GruppenID; Geschäfts- zeichen BGE	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
5	DE	BGR	11897915/9 564	*.pdf	Krull_e- tal_2004_Pot_Wirt sgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
6	DE	BGR	11897915/9 566	*.tif	Anlagen_Krull_e- tal_2004_Pot_Wirt sgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
7	DE	BGR	11897915/9 561	*.pdf	Wirth_2003_Li- tho_Petrophys	Wirth, H., Hoth, P., Krull, P., Espig, M. (2003): Regionale Tonstudie: Lithologi- sche und petrophy- sikalische Charakte- risierung von Tonfor- mationen mittels Bohrlochmessun- gen. – Bundesan- stalt für Geowissen- schaften und Roh- stoffe (BGR), Zwi- schenbericht; 72 Seiten, 10 Anlagen; Berlin/Hannover.
8	DE	BGR	11897915/9 566	*.tif	Anla- gen_Wirth_2003_L itho_Petrophys	Wirth, H., Hoth, P., Krull, P., Espig, M. (2003): Regionale Tonstudie: Lithologi- sche und petrophy- sikalische Charakte- risierung von Tonfor- mationen mittels Bohrlochmessun- gen. – Bundesan- stalt für Geowissen- schaften und Roh- stoffe (BGR), Zwi- schenbericht; 72 Seiten, 10 Anlagen; Berlin/Hannover.

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ GruppenID; Geschäfts- zeichen BGE	Daten- format	Dateiname	Bemerkungen
9	DE	BGR	11884574/8 906	*.mdb	Norddeutsch- land_Ost.mdb	Bohrdatenbank der Studie von (Hoth et al. 2007)
10	DE	BGE	11894617/9 253	*.xlsx	2020_04_08_Über- gabe_TEK_GI_Zu- sätzliche_Bohrun- gen_nach Ab- gleich_MA	Bohrungsdaten
12	DE	BGR	11867242/7 206	*.shp	150_kru_iso.shp ch11_lcr_t	Tiefen- und Mächtig- keitsangaben der Unterkreidebasis des Petroleum Geo- logical Atlas of the Southern Permian Basin Area (Doornenbal & Stevenson 2010)
13	ST	LAGB	11843326/7 98	*.shp	krb-krlu	Flächen des Barrêmeiums bis Un- ter Albiums (Unter- kreide), in denen mit einer Mindestmächtig- keit von 100 m in einer Teufe zwi- schen 300 m u. GOK und 2000 m u. GOK ver- mutlich vorhanden ist

Eigenrecherche

Thematische Karten

Es wurden folgende thematische Karten verwendet:

- Hiss, M. & Schönfeld, J. (2000): Regionale Verbreitung und Faziesräume in der Bundesrepublik. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Redaktion: M. Hiß & J. Mutterlose) (2000): Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland. – Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, 226: 186 S.,

68 Abb., 24 Tab.; Frankfurt a. M., <http://www.schweizerbart.de/pubs/isbn/sng/cfs-courie-3510610474-desc.html>

1. Heutige Verbreitung von Ablagerungen der Unterkreide (ohne transgressives Mittel- bis Ober-Albium) in Ostdeutschland
- P. A. Ziegler, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. 130 pp. folder with 40 maps or charts. The Hague: Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.
 1. Aptian-Albian Paleogeography
 2. Berriasian-Valanginian Paleogeography)
 3. Hauterivian-Barremian Paleogeography
 - Zentrales Geologisches Institut Berlin (Diener 1973) (Mächtigkeitkarten)
 1. Verbreitung der Unterkreide (Wealden bis Alb)
 2. Wealden/Valanginium
 3. Hauterivium
 4. Barremium/Unteralbium
 5. Mittel- bis Oberalbium
 - Zentrales Geologisches Institut Berlin (Diener 1973)
 1. Übersichtsdarstellung der Ausbildung des Barrême bis Unteralb
 2. Übersichtsdarstellung der Ausbildung des Hauterive
 3. Beckenerweiterung im Mittel- und Oberalb)
 4. Beckenerweiterung im Wealden und Valangin)
 - Karpe, W. (2008): Kreide. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 244-266, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
 1. Verbreitung und Mächtigkeit des Hauterives nach Diener (1973) (siehe Datenbericht)
 2. Verbreitung und Mächtigkeit des Wealdens und Valangins nach Diener (1973) (siehe Datenbericht)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Unterkreide in Sachsen-Anhalt geprüft wurde, ist in Tabelle 199 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 199: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m u. GOK (DGM_-300m) bzw. um 1500 m u. GOK (DGM_-1500m) absenken	<i>DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts;</i> <i>DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts</i>
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Dogger aus der Basisfläche Dogger (aus allen Kacheln)	<i>b_Unterkreide_ST.ts</i>
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	<i>Topflaeche_MACRO.ts</i>
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	<i>b_Unterkreide_ST_MACRORESULT.ts</i>
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	<i>b_Unterkreide_ST_MACRORESULT_qs.ts</i>
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	<i>MG_t_kru_ST.dxf</i> <i>MG_t_kru_ST.txt</i>
2. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	<i>Tongestein_Unterkreide_gesamt_MaGi.aprx</i>
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	
3. Digitalisierung von 2D geologischen Informationen (Tongesteinsvorkommen und Mächtigkeit)	
a) Erstellen des ArcGIS-Projekts	<i>Tongestein_Unterkreide_gesamt_MaGi.aprx</i>
b) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitung der Fazieskarten (Diener 1973; Karpe 2008; Hiß & Mutterlose 2000) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Sachsen-Anhalts	<i>DDR_Barreme_Unteralb_tonige_Fazies_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>DDR>Wealden_Valangin_tonige_Fazies_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>Verbreitungprä_mittelalbische_Unterkreide_gesamt_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>Karpe_2008_Sachsen_Anhalt_Paläokarte_Haute-rive_VG250_LAN_ST_Intersect1.shp</i> <i>Karpe_2008_Sachsen_Anhalt_Paläokarte>Wealden_Valangin_VG250_LAN_ST_Intersect1.shp</i>
c) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Mächtigkeitskarten (Diener 1973) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten sowie der gesamten Unterkreide und Verschnitt mit dem Landesumriss Sachsen-Anhalts	<i>DDR_Mächtigkeit_krU_gesamt_gr100thickness_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>DDR_Mächtigkeit>Wealden_Valangin_gr100m_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>DDR_Mächtigkeit_krU_Mittel_Oberalb_gr100mthickness_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>DDR_Mächtigkeit_krU_Haute-rive_gr100_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>DDR_Mächtigkeit_Barreme_Unteralb_gr100m_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i>
d) Verschnitt der erstellten Fazies- und Mächtigkeitspolygone aus 2b und 2c	<i>DDR_Barreme_Unteralb_tonig_gr100m_Verschnitt.shp</i> <i>DDR>Wealden_Valangin_tonig_gr100m_Verschnitt.shp</i> <i>Verbreitungprä_mittelalbische_Unterkreide_gesamt_gr100m_Verschnitt</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
e) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung des Kartenmaterials der Tonstudie von Krull et al. (2004) und Verschnitt mit dem Landesumriss Sachsen-Anhalts	<i>Krull_Tongestein_gr100_300bis1000GOK_untersuchungswürdig_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>Krull_Tongestein_gr100_kl1500GOK_potentiell_untersuchungswürdig_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>Mächtigkeit_marine_Unterkreide_gr100m_Krull_2004_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i>
f) Alle Bohrungen aus der Tonstudie (Hoth et al. 2007) plotten und nach kumulativer Mächtigkeit und Tongehalt auswerten.	<i>Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx</i>
4. Hinzufügen von geeigneten Flächen der stratigraphischen Einheiten Berriasium, Valanginium, Hauterivium; Mittel- und Oberalbium auf Basis der Auswertung der paläogeographischen Karten	
a) Verschnitt der vorhandenen Verbreitungskarte der tonigen Fazies im Berriasium (Wealden)/Valanginium (Diener 1973) mit der entsprechenden Mächtigkeitkarte (Diener 1973) aus Schritten 3b und 3c	<i>DDR_Wealden_Valangin_tonig_gr100m_Verschnitt.shp</i>
b) Verschnitt der vorhandenen Verbreitungskarte der tonigen Fazies im Aptium bis Albium (Ziegler 1990) mit der entsprechenden Mächtigkeitkarte (Diener 1973) aus Schritten 3b und 3c	<i>GA_AptianAlbian_shale_DDR_Mächtigkeit_Mittel_Oberalb_Verschnitt.shp</i>
5. Plausibilitätsprüfung der Ausdehnung der Modellflächen aus 1.h und Bewertung des Materials aus 3. und 4. gegebenenfalls Erweiterung oder Reduktion der ausgewiesenen Flächen	
e) Verifizierung der Tiefenlage der Unterkreidebasis der ausgewiesenen Flächen (Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area, Doornbal & Stevenson 2010)	<i>SPBA_Depth_Lower_Cretaceous.lpkx</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
f) Überprüfung der Mächtigkeitsangaben der Flächen auf Basis des Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (Doornenbal & Stevenson 2010) und der Tonstudie (Krull et al. 2004)	<i>SPBA_Thickness_LowerCretaceous.lpkx</i> <i>Mächtigkeit_marine_Unterkreide_gr100m_Krull_2004_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i>
g) Überprüfung der Fläche der ausgewiesenen Gebiete zur Erfüllung der Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“	
h) Vergleich der in den Tonstudie von Krull et al. (2004) ausgewiesenen Gebiete mit den Flächen	<i>Krull_Tongestein_gr100_300bis1000GOK_untersuchungswürdig_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i> <i>Krull_Tongestein_gr100_kl1500GOK_potentiell_untersuchungswürdig_VG250_LAN_ST_Intersect.shp</i>
i) Abgleich mit Bohrungsdaten, die außerhalb der ausgewiesenen Fläche liegen	<i>Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx</i>
6. Finale Ausweisung des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes Nach Prüfung aus 5. konnte das Ergebnis aus 1.h bestätigt und Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, konnten übernommen werden	<i>Mindestanforderungsgebiete_ST.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 199 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete 3D-Modell für Sachsen-Anhalt wurde im Rahmen der Standortauswahl auf Basis des 2D-Kartenwerkes des SPBA erstellt (Doornenbal & Stevenson 2010). Auf Basis von Isolinien wurden Hilfsflächen modelliert, deren Verschneidungen und Durchdringungen entfernt wurden. Aus diesen Hilfsflächen wurden elf Basisflächen modelliert.

- Tertiär (ST_131_t_iso_rev01)
- Oberkreide (ST_140_kro_iso_rev01)
- Unterkreide (ST_150_kru_iso_rev01)

- Oberjura (ST_160_jo_iso_rev01)
- Mitteljura (ST_170_jm_iso_rev01)
- Unterjura (ST_180_ju_iso_rev01)
- Keuper (ST_190_k_iso_rev01)
- Oberer Buntsandstein (ST_201_so_iso_rev01)
- Unterer Buntsandstein (ST_210_su_iso_rev01)
- Zechstein (ST_220_z_iso_rev01)
- Rotliegendesedimente (ST_240_ro_iso_rev01)

Störungen sind im Datensatz des SPBA als Linien ohne Teufenangaben ausgewiesen. Im SPBA-3D wurden diese Störungslinien auf die modellierten Flächen projiziert ohne die Basisflächen zu versetzen.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 199 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Unterkreide wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche Unterkreide (ST_150_kru_iso_rev01) verwendet.

Das Digitale Geländemodell für Sachsen-Anhalt wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 199, 1a – e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Unterkreide und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen der Oberkreide und des Tertiär sowie der um 300 m u. GOK abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde (Tabelle 199, 1f).

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ m u. GOK überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert (Tabelle 199, 1g).

Die Bearbeitungsfläche Dogger wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 199, 1h).

2D-Bearbeitung

Alle verwendeten Informationen (Tabelle 198) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt. Die aus dem Geomodell extrahierten Flächen für Sachsen-Anhalt, die eine Mindestmächtigkeit der Unterkreide von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOKvorkommen, wurden zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wurde.

Da die aus dem 3D-Modell von Sachsen-Anhalt extrahierten Flächen lediglich die stratigraphischen Einheiten Barremium bis Unteralbium widerspiegeln, bestand die Notwendigkeit, die existierenden Gebiete zusätzlich für das Berriasium, Hauterivium, Valanginium sowie das Mittel- und Oberalbium -sofern verbreitet- auf Basis von paläogeographischen Karten zu erweitern.

Kartenmaterial

Alle oben beschriebenen Karten wurden vor der Auswertung falls nötig digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert.

Das Kartenmaterial des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973) und der Deutschen Stratigraphischen Kommission (Hiß & Mutterlose 2000) wurde im Hinblick auf die Verbreitung und Mächtigkeit von tonigen Formationen der stratigraphischen Einheiten Wealden (Berriasium) und Valanginium, Hauterivium und Barremium bis Unteralbium digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert. Der Wealden (Berriasium) und das Valanginium wurde dabei zusammen dargestellt, da der allgemeine Aufbau und die Biostratigraphie für beide stratigraphische Einheiten schwer zu unterscheiden sind (Diener 1973). Es existiert keine genauere Differenzierung zwischen dem Barremium, Aptium und Unteralbium.

Das Kartenmaterial des ZGI Berlin (Diener 1973), das Isolinien der Gesamtmächtigkeit der Unterkreide beinhaltet, wurde ebenfalls digitalisiert und georeferenziert. Die anschließende Vektorisierung erfolgte auf Grund teils fehlender Angaben zu sekundären Mächtigkeiten lediglich basierend auf primären Mächtigkeiten. Der daraus resultierende Unsicherheitsfaktor der potentiellen Reduktion der Mächtigkeit zum Zeitpunkt der Ablagerung z. B. durch Erosion muss in Erwägung gezogen und mit den Angaben aus dem geologischen 3D-Modell geprüft werden. Bohrungsdaten und Schichtenverzeichnisse wurden als Referenzdatensätze zur Überprüfung der Repräsentativität der ausgewerteten Mächtigkeitskarten herangezogen.

Ein Verschnitt zwischen den auf den Karten des Zentralen Geologischen Instituts Berlin (Diener 1973) basierenden Polygonen der Verbreitung der tonigen Fazies und denen,

die eine Mindestmächtigkeit größer als oder gleich 100 m der gesamten Unterkreide aufweisen, wurde unter Zuhilfenahme des ArcGIS Pro-Tools „Überschneiden“ durchgeführt, um die Mindestanforderungen Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit anzuwenden.

Abgleich mit Bohrungsdaten

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten wurden auf den Tonanteil, die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation und die Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK innerhalb der Landesgrenzen von Sachsen-Anhalt geprüft.

Ein Abgleich der Bohrungen mit den Ergebnissen der Mächtigkeits- und Fazieskarten erfolgte in folgenden Schritten:

9. Einladen der Bohrungen (Hoth et al. 2007).
10. Abgleich des Tonanteils und der kumulativen Mächtigkeiten der Bohrungsdaten mit den erzeugten Flächen.

Bewertung der potentiellen Tongesteine aller Stufen

Basierend auf den oben beschriebenen digitalisierten thematischen Karten und Bohrungsdaten sowie den aus dem 3D-Modell extrahierten Flächen wurden alle Stufen der Unterkreide separat im Hinblick auf ihre Eignung als potentielles Tongestein bewertet.

Berriasium und Valanginium

Die Auswertung des Berriasium und Valanginium erfolgt auf Grund fehlender Informationen aus dem 3D-Modell auf Basis der Fazies- und Mächtigkeitskarten des ZGI Berlin (Diener 1973) und aus Karpe (2008). Ein Verschnitt der Verbreitung der tonigen Fazies im Wealden (Berriasium) / Valanginium mit der entsprechenden Mächtigkeitskarte führte zur Erzeugung potentiell auszuweisender Gebiete, die die Mindestanforderung erfüllen.

Hauterivium

Die Verbreitungskarten aus Karpe (2008) zeigen Vorkommen des Hauterivium in Sachsen-Anhalt; basierend auf den Fazieskarten des ZGI (Diener 1973) ist jedoch keine tonige Fazies verbreitet. Eine Auswertung der Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) zeigt zwar Bohrungen, die Tongesteine enthalten, diese weisen jedoch keine adäquaten Tonanteile größer als 80 % auf. Daher wurde die vom Modell ausgewiesene Fläche nicht um die Verbreitung des Hauterivium erweitert.

Barremium bis Unteralbium

Die Verbreitung des Barremium bis Unteralbium ist in Sachsen-Anhalt durch die aus dem 3D-Modell extrahierten Flächen bestätigt und wird durch Fazies- und Mächtigkeitskarten des ZGI Berlin (Diener 1973) und der Deutschen Stratigraphischen Kommission (Hiß & Mutterlose 2000) sowie durch Bohrungsdaten aus der Tonstudie (Hoth et al. 2007) zusätzlich belegt.

Mittelalbium bis Oberalbium

Für das Mittel- bis Oberalium lagen keine modellierten Flächen vor, sodass die Ausweisung von Gebieten, die Tongestein enthalten, auf Basis des georeferenzierten, digitalisierten und vektorisierten Kartenmaterials erfolgte. Dem „Geological Atlas of Western and Central Europe“ (Ziegler 1990) zufolge ist die Fazies „Shale“ in Sachsen-Anhalt verbreitet und aus Diener (1973) stehen entsprechende Mächtigkeitskarten zur Verfügung.

Fazit

Es ist deutlich erkennbar, dass Krull et al. (2004) eine weitaus höhere Anzahl an Flächen ausweisen als das Landesmodell und die BGE. Da diese auf Grund der vorhandenen Datengrundlage (Studien sowie Fazies- und Mächtigkeitskarten) jedoch weder nachvollzogen noch belegt werden konnten, fand keine Flächenerweiterung der ausgewiesenen Gebiete und der Modellfläche, die die Mindestanforderungen erfüllen, statt.

Im finalen Schritt wurden die neu entstandenen Gebiete hinsichtlich ihrer Fläche überprüft und Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² gelöscht. Die entstandenen Gebiete wurden benannt und anschließend als SHP-Datei exportiert.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammensetzung und der Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

In den die Mindestanforderungen erfüllenden Gebieten befinden sich zwei Bohrungen (Tabelle 200), die Tonanteile überwiegend größer als 80 % aufweisen und daher die Eignung der ausgewiesenen Flächen als Barriere verifizieren.

Tabelle 200: Übersicht über Bohrungen der Tonstudie der Tonanteilsklasse 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) in den Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen

Object-ID	LOCID	Long Name
331	132	Büste 1/78
350	420	Seehausen 1 /59

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten ist daher zu erwarten, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für das Tongestein der Unterkreide in Sachsen-Anhalt **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit der Unterkreide wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit der Unterkreide zusammen.

Die aus dem 3D-Modell hervorgegangenen Mächtigkeitsangaben wurden mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) sowie den Mächtigkeitskarten des ZGI Berlin (Diener 1973) als auch den durch die regionale Tonstudie von Krull et al. (2004) überprüft und ausreichende Mächtigkeiten von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Gebieten verifiziert. Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird somit als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Unterkreide wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Die aus dem 3D-Modell hervorgegangenen Tiefenangaben wurden mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) überprüft und ausreichende Tiefenangaben von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Gebieten verifiziert. Die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK“ wird daher als zunächst **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt - ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden (könnten). Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 92 ist das Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Einheit Unterkeide in Sachsen-Anhalt und in Abbildung 93 ein geologisches Profil durch Sachsen-Anhalt dargestellt, welches die über der Unterkeide liegenden Einheiten widerspiegelt.

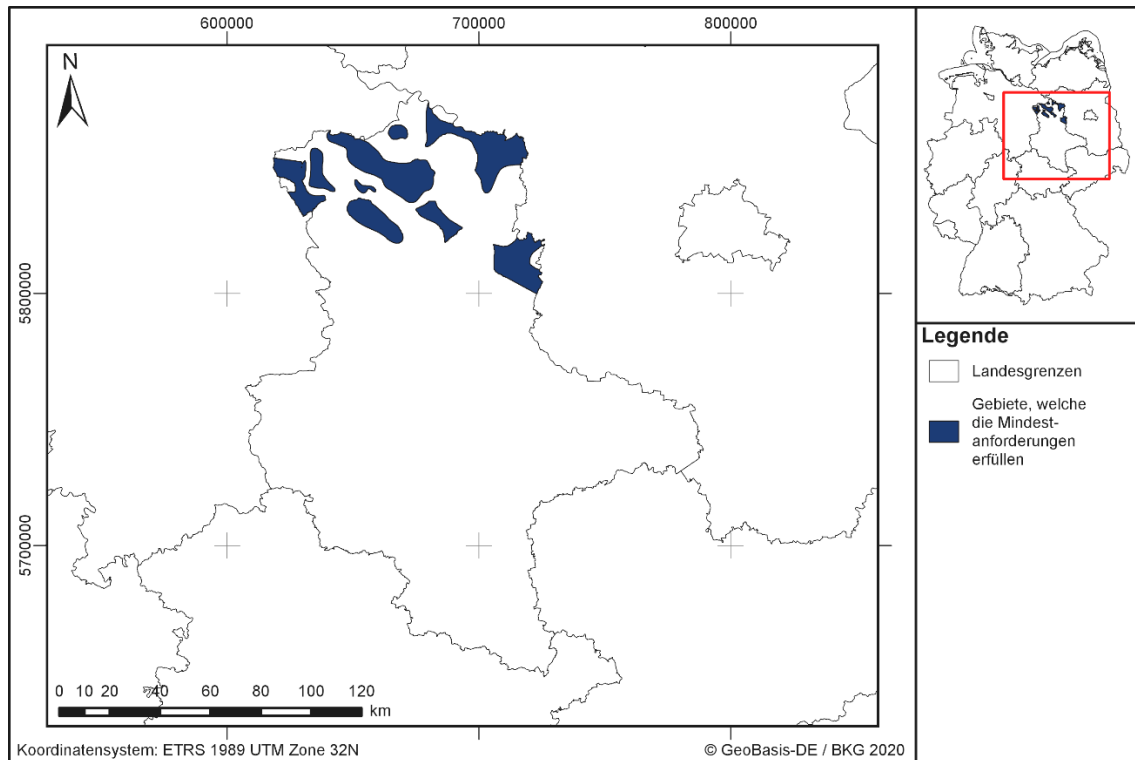


Abbildung 92: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen

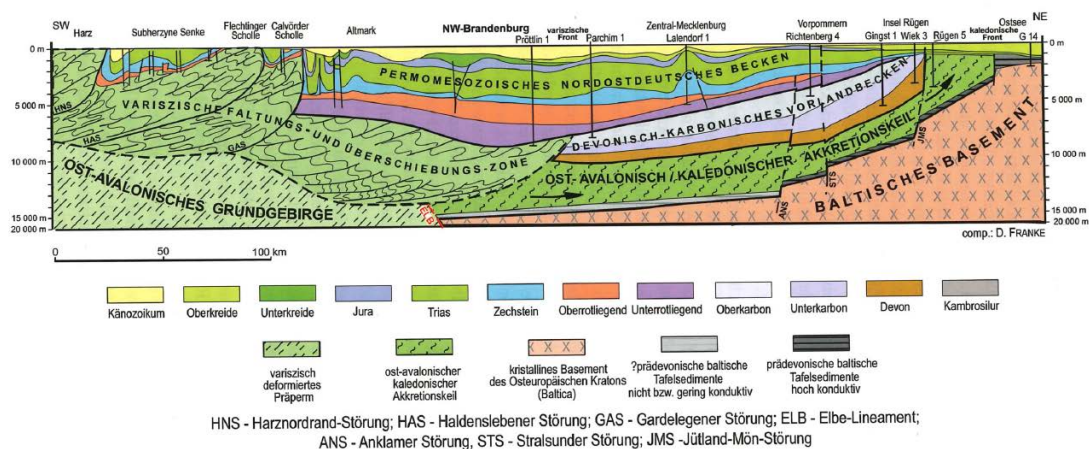


Abbildung 93: Geologisch-tektonischer Schnitt vom Harzvariszikum über Brandenburg bis zur Offshore-Bohrung G 14/1 in der südlichen Ostsee (Franke et al. 2015b)

Eine Auflistung dieser auch als „Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen“ bezeichneten Ergebnisflächen ist in Tabelle 201 zu finden.

Tabelle 201: Auflistung aller Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, der Unterkreide in Sachsen-Anhalt mit Flächenangaben

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
ST_t_kru_1	19
ST_t_kru_2	35
ST_t_kru_3	89
ST_t_kru_4	107
ST_t_kru_5	184
ST_t_kru_6	185
ST_t_kru_7	280
ST_t_kru_8	425
ST_t_kru_9	451

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 202 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 202: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppen-ID	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11902999	9870		ST_SKUA_Export		SPBA-3D für Sachsen-Anhalt
11884574	8906	2385810	Norddeutschland_Ost.mdb	Schichtenverzeichnisse Büste 1/78 Seehausen 1 /59	Bohrdatenbank Tonstudie; entscheidungserheblich: Tonanteilklassse & kumulative Mächtigkeit (Hoth et al. 2007)

Entscheidungserhebliche Daten aus Eigenrecherche

Geological Atlas_1990_Aptian-Albian: Paläogeographische Karten des Geological Atlas of Central and Western Europe; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen des Aptiums und Albium (Ziegler 1990)

ZGI (1979) UK_Wealden_Valangin: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Isolinien der Unterkreidemächtigkeiten größer als oder gleich 100 m im Berriasium (Wealden) und Valanginium (Diener 1973)

ZGI (1979) UK_Mittel-OberAlb: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Isolinien der Unterkreidemächtigkeiten größer als oder gleich 100 m im Mittel-Oberalbium (Diener 1973)

DDR_Wealden_Valangin_ZGI_1973: Digitalisierte paläogeographische Karten der DDR; entscheidungserheblich: Verbreitungsgrenzen der tonigen Fazies im Berriasium (Wealden) und Valanginium (Diener 1973)

1.3.28 Unterkreide – Schleswig-Holstein

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Unterkreide, die aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Schleswig-Holstein.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgte nach § 23 StandAG mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographischer Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Schleswig-Holstein, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Kreide, Unterkreide

Die Unterkreide ist in folgende Stufen untergliedert: Berriasium, Valanginium, Hauterivium, Barremium, Aptium, Albium. Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten der Unterkreide und deren lithologische Ausprägung sind der tabellarischen Übersicht Schleswig-Holsteins (Kapitel 5) zu entnehmen. Das Berriasium stellt die stratigraphisch älteste Einheit der Unterkreide dar. Alle Stufen sind in Schleswig-Holstein (SH) verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden in Schleswig-Holstein alle Einheiten abgesehen vom Oberen Aptium betrachtet.

Geographische Verbreitung

In Schleswig-Holstein werden aus lithostratigraphischer Sicht zwei Verbreitungsgebiete unterschieden: 1. ein nördliches Gebiet um Helgoland und 2. ein südlich gelegenes Gebiet mit Übergang zum nördlichen Niedersachsen (Lägerdorf, Kronsmoor, Hemmoor). Einheiten des Berriasium und Valanginium sind durch starke Erosion lediglich lückenhaft verbreitet (Schönfeld et al. 2000). Erst gegen Ende des Valanginiums erreichte die Transgression die Pompeckjsche Scholle und Sedimentation setzte ein (Schönfeld et al. 2000).

Fazies-/Ablagerungsraum

Im stratigraphisch jüngsten Abschnitt der Unterkreide – dem Berriasium (Wealden) – erfolgte eine Absenkung und Überflutung des Niedersächsischen Beckens sowie eine Hebung des Pompeckschen Blocks – und somit Hebung Schleswig-Holsteins. Eine damit verbundene Abschnürung des Gebietes von der Nordsee resultierte in der Sedimentablagerung in einem limnischen Milieu (Hese 2012). Ein starker Anstieg des Meeresspiegels (Transgression) im Hauterivium und Valanginium führte im Norddeutschen Becken zu einem Wechsel in einen (flach)marinen Sedimentationsraum, der vor allem durch die Ablagerung von Sanden, Tonen und Mergeln charakterisiert ist (Sirocko 2012; Hese 2012).

Lithologie (Hese 2012; Schönfeld et al. 2000)

Die einzelnen Stufen der Unterkreide lassen sich lithologisch wie folgt kurz beschreiben:

- Berriasium:
 - o Lückenhaft Tonsteine, Siltsteine, Schillkalkstein, vereinzelt dünne Sandsteinlagen und Kohleflöze; meist Hiatus
- Valanginium/Hauterivium:
 - o Tonsteine und schluffige Tonsteine, Mergelsteine, vereinzelt Sandsteinlagen
- Barremium/Unteraptium
 - o (schluffige) Tonsteine (z. B. Blättertone, Schwarzschiefer), Tonmergelsteine, Mergelsteine, Tonmergelschiefer (Fischschiefer), Kalksteine
- Oberes Aptium/Albium:
 - o Oberes Aptium: Kalk- bis Kalkmergelsteine
 - o Albium: Tonmergelstein, Kalkmergelstein
 - o Schwellenfazies im Raum Helgoland: Kalksteine („Minimus-Kreide“, „Ewaldi-Kreide“), gelbe und rote Mergelsteine
 - o Schwellenfazies am Nordrand des Niedersächsischen Beckens und nördlich der Pompeckj-Schwelle: Mergelsteine und mergelige Tonsteine („Minimus-Schichten“)

Mächtigkeit

Nachfolgende Mächtigkeiten sind für die einzelnen Stufen der Unterkreide im Untersuchungsgebiet heranzuziehen.

- Berriasium: Gesamtmächtigkeit bis zu 300 m
- Valanginium/Hauterivium: Gesamtmächtigkeit ungefähr 250 m
- Barremium/Unteraptium: Gesamtmächtigkeit ungefähr 150 m

- Oberes Aptium/Albium: Gesamtmächtigkeit ungefähr 250 m

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 203). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 203: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ GruppenID; Geschäftszeichen BGE	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
1	DE	BKG	11875056/7728	*.shp	Verwaltungsgebiete (VG25)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BGR	11844870_01/6846	*.pdf	BGR_Tonstudie2007	Studie der BGR
3	DE	BKG	11865482/8853	*.ASCII	DGM10_dyn_mesh_to l10	Digitales Geländemodell
4	SH	LLUR	11839735/6220	*.pl/*ts	3D_Basismodell_SH	3D Basismodell SH (Hese et al. 2012)
5	DE	BGR	11897915/9566	*.tif	Anlagen_Krull_etal_2004_Pot_Wirtsgesteine	Studie der BGR (Krull et al. 2004)
6	DE	BGR	11884574/8906	*.mdb	Norddeutschland_West.mdb	Bohrdatenbank der Studie von (Hoth et al. 2007)
7	DE	BGR	11867242/7206	*.shp	150_kru_iso.shp ch11_lcr_t	Tiefen- und Mächtigkeitsangaben der Unterkreidebasis des Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (Doornenbal & Stevenson 2010)

Eigenrecherche

Thematische Karten

Es wurden folgende thematische Karten verwendet:

- Ziegler, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. 130 pp. folder with 40 maps or charts. The Hague: Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.
 1. Hauterivian-Barremian Paleogeography
- Schott, W., Jaritz, W., Kockel, F., Sames, C. W., V. Stackelberg, V., Stets, J., Stoppel, D., Baldschuhn, R. & Krampke, K. D. (1969): *Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa*. Hannover: Bundesanstalt für Bodenforschung. ISBN ES184001000
 1. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Hauterive – Fazies und Mächtigkeiten
 2. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Valendis – Fazies und Mächtigkeiten
 3. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Hauterive – Fazies und Mächtigkeiten
 4. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Barreme – Fazies und Mächtigkeiten
 5. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Apt – Fazies und Mächtigkeiten
 6. Paläogeographische Übersichtskarte von Nordwestdeutschland – Alb – Fazies und Mächtigkeiten

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Unterkreide in Schleswig-Holstein geprüft wurde, ist in Tabelle 204 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 204: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m u. GOK (DGM_-300m) beziehungsweise um 1500 m u. GOK (DGM_-1500m) absenken	<i>DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts;</i> <i>DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts</i>
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Unterkreide aus der Basisfläche Unterkreide	<i>b_Unterkreide_SH.ts</i>
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	<i>Topflaeche_MACRO.ts</i>
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500 m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/ Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m löschen	<i>b_Unterkreide_SH_MACRORESULT.ts</i>
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	<i>b_Unterkreide_SH_MACRORESULT_qs.ts</i>
h) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	<i>MG_t_kru_SH.dxf</i> <i>MG_t_kru_SH.txt</i>
2. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	<i>Tongestein_Unterkreide_gesamt_MaGi.aprx</i>
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
3. Digitalisierung von geologischen 2D-Informationen (Tongesteinsvorkommen und Mächtigkeit)	
a) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitung der tonigen Fazies der Fazieskarten (Ziegler 1990), (Hiß & Mutterlose 2000) der jeweiligen stratigraphischen Einheiten und Verschnitt mit dem Landesumriss Schleswig-Holsteins	<p><i>GA_HauterivianBarremian_shale_VGL250_LAN_SH_Intersect.shp</i></p> <p><i>DtstratKomm_Verbreitungpräalbsche_UK_VG250_BB_Intersect.shp</i></p>
b) Digitalisierung, Georeferenzierung und Vektorisierung der Verbreitung der jeweiligen stratigraphischen Einheiten der Unterkreide von (Schott 1969) und Verschnitt mit dem Landesumriss Schleswig-Holsteins	<p><i>Schott_1969_Verbreitung_Wealden_VG250_LAN_SH_Intersect.shp</i></p> <p><i>Schott_1969_Verbreitung_Hauterive_VG250_LAN_SH_Intersect.shp</i></p> <p><i>Schott_1969_Verbreitung_Valendis_VG250_LAN_SH_Intersect.shp</i></p> <p><i>Schott_1969_Verbreitung_Barreme_VG250_LAN_SH_Intersect.shp</i></p> <p><i>Schott_1969_Verbreitung_Apt_VG250_LAN_SH_Intersect.shp</i></p> <p><i>schott_et_al_1969_Wealden_bis_Apt_VG250_LAN_SH_Intersect.shp</i></p> <p><i>schott_et_al_1969_Wealden_bis_Alb_VG250_LAN_SH_Intersect.shp</i></p>
c) Alle Bohrungen aus den Bohrdatenbanken des LLUR plotten und gegebenenfalls Schichtenverzeichnisse auf Vorhandensein toniger Unterkreidefazies sowie deren Mächtigkeit und Tiefenlage prüfen.	
d) Alle Bohrungen aus der Tonstudie (Hoth et al. 2007) plotten und nach kumulativer Mächtigkeit und Tongehalt auswerten.	<p><i>Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx</i></p>
4. Plausibilitätsprüfung der Ausdehnung der Modellflächen aus 1.h und Bewertung des Materials aus 3. gegebenenfalls Erweiterung oder Reduktion der ausgewiesenen Flächen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) Verifizierung der Tiefenlage der Unterkreidebasis der ausgewiesenen Flächen (Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area, Doornenbal & Stevenson 2010)	<i>SPBA_Depth_Lower_Cretaceous.lpkx</i>
b) Vergleich der Mächtigkeitsangaben der marinen Unterkreide aus der Tonstudie von Krull et al. (2004)	<i>Mächtigkeit_marine_Unterkreide_gr100m_Krull_2004_VGL250_LAN_SH_Intersect.shp</i>
c) Vergleich der in der Tonstudie von Krull et al. (2004) ausgewiesenen Gebiete mit den durch das Landesmodekk ausgewiesenen Gebieten	<i>Krull_Tongestein_gr100_kl1500GOK_potentiell_untersuchungswürdig_VGL250_LAN_SH_Intersect.shp</i>
d) Auswertung und Vergleich mit der Blättertonverbreitung der NiKo-Studie (Ladage et al. 2016)	<i>NiKo_kruBlaettertone_Verbreitung0m_V1_poly_VGL250_LAN_SH_Intersect.shp</i>
e) Abgleich mit Bohrungsdaten, die außerhalb der ausgewiesenen Fläche liegen	<i>Bohrungen_Tonstudie_Hoth et al.lpkx</i>
5. Finale Ausweisung des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes Nach Prüfung aus 4. konnte das Ergebnis aus 1h bestätigt und Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen übernommen werden.	<i>Mindestanforderungsgebiete_SH.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 204 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das Basismodell SH ist ein erstes geologisches 3D-Modell des Geologischen Dienstes SH (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, LLUR) aus dem Jahr 2012 (Hese 2012). Zur Bearbeitung des Modells wurden Daten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland (Baldschuhn et al. 2001) verwendet. Störungsflächen wurden nicht als durchgehende Flächen ausgehalten, sondern lediglich als vertikale Versätze dargestellt. Das modellierte Gebiet umfasst das komplette Bundesland Schleswig-Holstein inklusive der 12 Seemeilenzone. Folgende Flächen wurden hauptsächlich als Basisflächen modelliert:

- GTA3D_00_Topographie: Geländeoberfläche

- GTA3D_01_Basis_TmiR: Mittleres Miozän
- GTA3D_02_Basis_TmiU: Miozän
- GTA3D_03_Basis_ToIM: Mittleres Oligozän
- GTA3D_04_Basis_TeoM: Mittleres Eozän
- GTA3D_05_Basis_TpaO: Oberes Paläozän
- GTA3D_06_Basis_KrO: Obere Kreide
- GTA3D_07_Basis_KrU: Untere Kreide
- GTA3D_08_Basis_JO: Oberer Jura
- GTA3D_09_Basis_JM: Mittlerer Jura
- GTA3D_10_Basis_JU: Unterer Jura
- GTA3D_11_Basis_K: Keuper
- GTA3D_12_Basis_SO: Oberer Buntsandstein
- GTA3D_13_Basis_SU: Unterer Buntsandstein
- GTA3D_14_Basis_Z: Zechstein
- GTA3D_Salzdiapire: Hüllflächen der Salzstrukturen

Da auch Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Bereich der Ost- und Nordsee erwartet werden, wurde das Basismodell Schleswig-Holstein verwendet und nicht das ebenfalls vorhandene StörTief-Modell.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 204 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Bearbeitungsfläche Unterkreide wurde aus der Basisfläche Unterkreide des Basismodells Schleswig-Holstein erstellt.

Das digitale Geländemodell für Schleswig-Holstein wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 204, 1a-e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Unterkreide und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen der Oberkreide sowie der um 300 m u. GOK abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen

der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 204, 1f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden. Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profileschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten (Tabelle 204, 1g).

Die Bearbeitungsfläche Unterkreide wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 204, 1h).

2D-Bearbeitung

Alle verwendeten Informationen (Tabelle 203) wurden in einem ArcGIS Pro-Projekt zusammengestellt. Die aus dem Geomodell extrahierten Flächen für Schleswig-Holstein, die eine Mindestmächtigkeit der Unterkreide von 100 m aufweisen und in einer Tiefe zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK vorkommen, wurden zunächst in das ArcGIS Pro-Projekt eingeladen und zur weiteren Bearbeitung aufbereitet. Dafür wurden sie in ein Polygon konvertiert, indem die Dreiecksstruktur aufgelöst wurde.

Auswertung der thematischen Karten

10. Alle oben beschriebenen Karten wurden vor der Auswertung falls nötig digitalisiert, georeferenziert und vektorisiert.
11. Das Kartenmaterial des Paläogeographischen Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa (Schott 1969) wurde auf die Verbreitungsgrenzen der einzelnen stratigraphischen Einheiten der Unterkreide überprüft, digitalisiert, georeferenziert und anschließend vektorisiert.

Abgleich mit Bohrungsdaten

Das geologische Landesamt von Schleswig-Holstein hat Bohrungsdaten in Form einer Datenbank geliefert. Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden zur Qualitätssicherung geprüft.

Zusätzlich wurden die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten auf den Tonanteil, die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation und die Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK innerhalb des Landesgrenzen von Schleswig-Holstein geprüft.

Ein Abgleich der Bohrungen mit den Ergebnissen der Mächtigkeits- und Fazieskarten erfolgte in folgenden Schritten:

11. Einladen der Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) sowie der Bohrungsdatenbank des geologischen Landesamtes
12. Im Falle der Landesbohrdatenbank: Abgleich der mit den Bohrungsdaten übermittelten Schichtenverzeichnisse mit den erzeugten Flächen.
13. Im Falle der Tonstudie: Abgleich des Tonanteils und der kumulativen Mächtigkeiten der Bohrungsdaten mit den erzeugten Flächen.

Bewertung der potentiellen Tongesteine aller Stufen:

Da das 3D-Modell des Landes Schleswig-Holstein die komplette Unterkreide beinhaltet, können die einzelnen stratigraphischen Stufen nicht separat analysiert werden. Ein Vergleich der ausgewiesenen Gebiete mit den Verbreitungskarten der „Shale“-Fazies des „Geological Atlas of Western and Central Europe“ (Ziegler 1990) sowie den Verbreitungskarten der Unterkreide des Paläogeographischen Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa (Schott 1969) bestätigt die Modellflächen.

Eine zusätzliche Verifizierung erfolgte durch die Bohrungsdatenbank der Tonstudie (Hoth et al. 2007), die jedoch lediglich vier Bohrungen mit einem Tonanteil größer als 80 % (Hoth et al. 2007) für Schleswig-Holstein ausweist.

Die von Krull et al. (2004) zusammengestellten (potentiell) untersuchungswürdigen Gebiete für das endlagerrelevante Tongestein weisen zusätzliche Flächen zu den aus dem 3D-Modell extrahierten aus. Auf Grund der vorliegenden Daten (Bohrungsdaten, Schichtenverzeichnisse, Studien sowie Fazies- und Mächtigkeitkarten) war jedoch weder eine Nachvollziehbarkeit noch eine Verifizierung dieser zusätzlichen Bereiche möglich, so dass keine Erweiterung der bislang ausgewiesenen Gebiete erfolgte.

Die NiKo-Studie der BGR (Ladage et al. 2016) zeigt die Verbreitung von Blättertonen in der Unterkreide in Schleswig-Holstein, die auch über die von durch das Landesmodell bereitgestellten Flächen hinausgeht. Werden diese Daten jedoch mit der Mächtigkeit von Tongesteinsformationen auf Basis der regionalen Tonstudie von Krull et al. (2004) verschnitten, verbleiben lediglich Flächen, die erstens die bereits durch das 3D-Modell ausgewiesenen Gebiete überlagern oder zweitens solche, die die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ nicht erfüllen. Es erfolgte daher keine Erweiterung der bereits ausgewiesenen, den Mindestanforderungen entsprechenden Gebiete.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammen-

setzung und der Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen, weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) bestätigen das Erfüllen der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit mit einem adäquaten Tonanteil (überwiegend größer als 80 %) in einigen der ausgewiesenen Gebiete (Tabelle 205). Auffällig ist jedoch, dass die Tonstudie drei zusätzliche Lokationen mit einem Tongehalt der Klasse 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) ausweist. Da diese jedoch das Mindestanforderungskriterium der kumulativen Mächtigkeit nicht erfüllt, findet keine Erweiterung der zuvor ausgewiesenen Flächen statt.

Tabelle 205: Übersicht über Bohrungen der Tonstudie der Tonanteilkategorie 1a (Tonanteil überwiegend größer als 80 %) in den Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen

Object-ID	LOCID	Long Name
238	1	Glückstadt T 1
355	1	Glückstadt T 1
3	28	Krempe 2/1938
150	12	Offenseth 1
242	12	Offenseth 1

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten ist daher zu erwarten, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für das Tongestein der Unterkreide in Schleswig-Holstein **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit der Unterkreide wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit der Unterkreide zusammen.

Die aus dem 3D-Modell hervorgegangenen Mächtigkeitsangaben wurden mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) überprüft und ausreichende Mächtigkeit von Unterkreideformationen in den ausgewiesenen Gebieten verifiziert.

Ein zusätzlicher Vergleich mit denen durch Krull et al. (2004) als „potentiell untersuchungswürdig“ eingestuften Gebieten als auch der von Krull et al. (2004) erstellten Mächtigkeitkarte der marinen Unterkreide bestätigt die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“.

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Unterkreide wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Mithilfe der Daten des „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (Doornenbal & Stevenson 2010) erfolgte eine weitere Überprüfung der Mindestanforderung Tiefenlage. Diese ergab, dass die Tiefenlage der Unterkreidebasis in den ausgewiesenen Gebieten immer zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK liegt.

Die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen, wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 94 ist das Ergebnis der Anwendung der Mindestanforderungen für die Einheit Unterkreide in Schleswig-Holstein dargestellt. Abbildung 95 und Abbildung 96 zeigen geologische Profile durch Schleswig-Holstein, welche die sich über der Unterkreide liegenden Einheiten widerspiegeln.

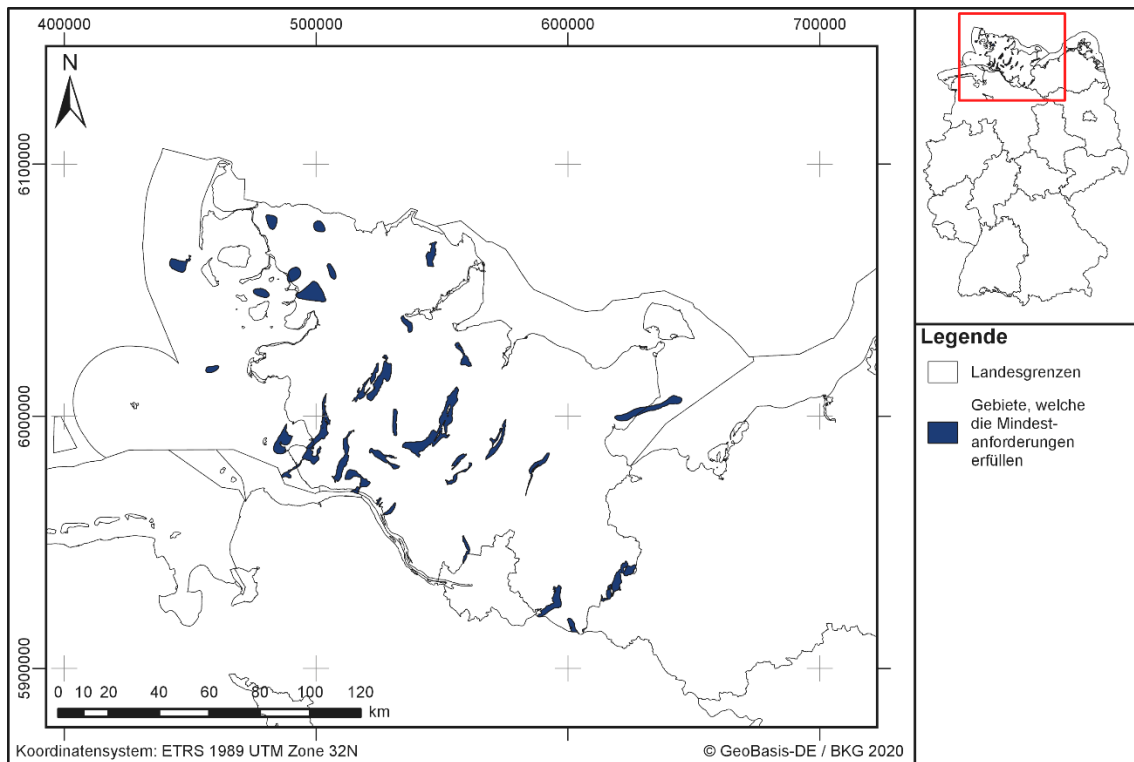


Abbildung 94: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen

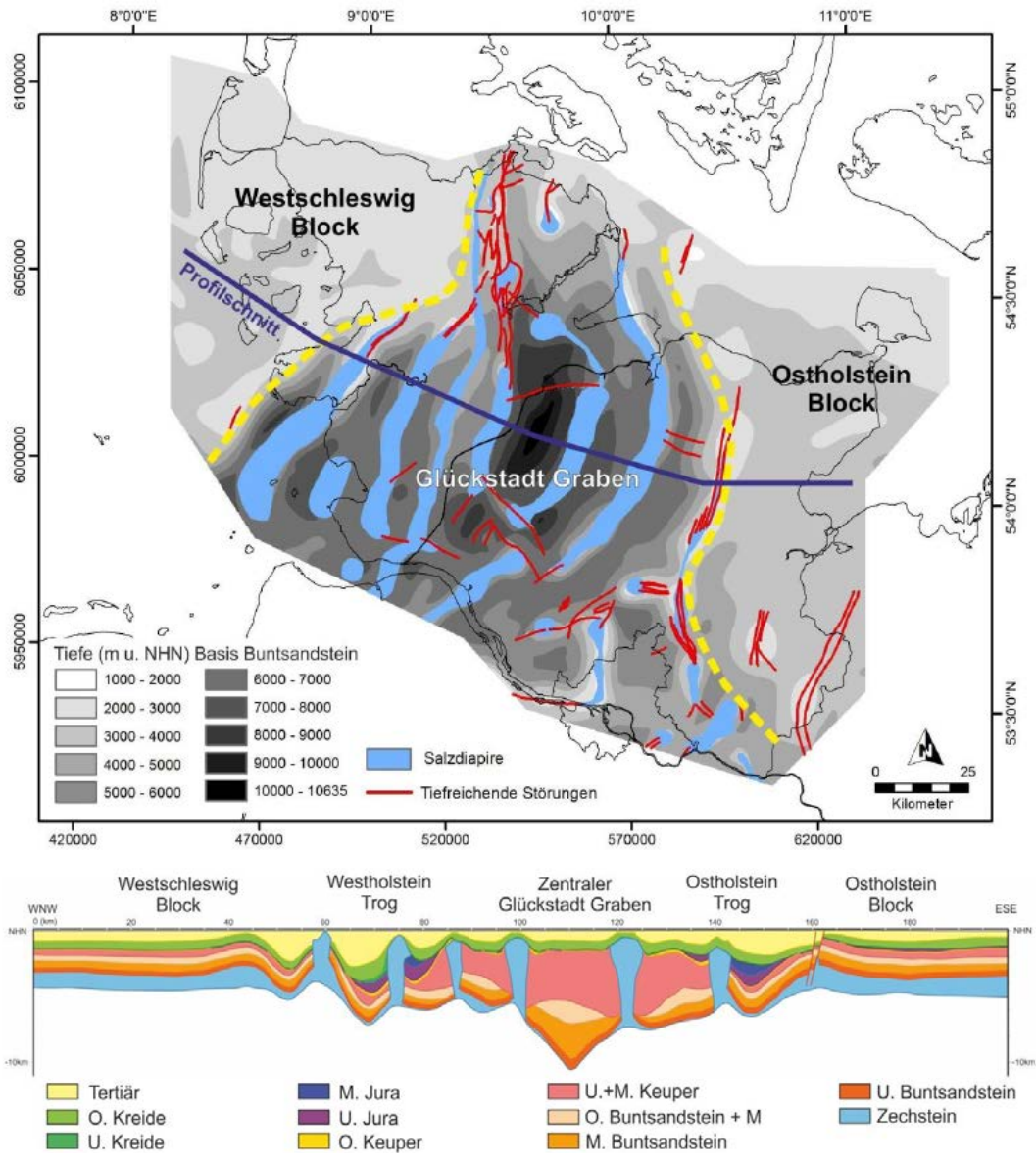


Abbildung 95: Geologischer Profilschnitt durch Schleswig-Holstein (Thomsen et al. (2017), basierend auf dem 3D-Modell SH – LLUR SH 2016 von Baldschuhn et al. (2001)

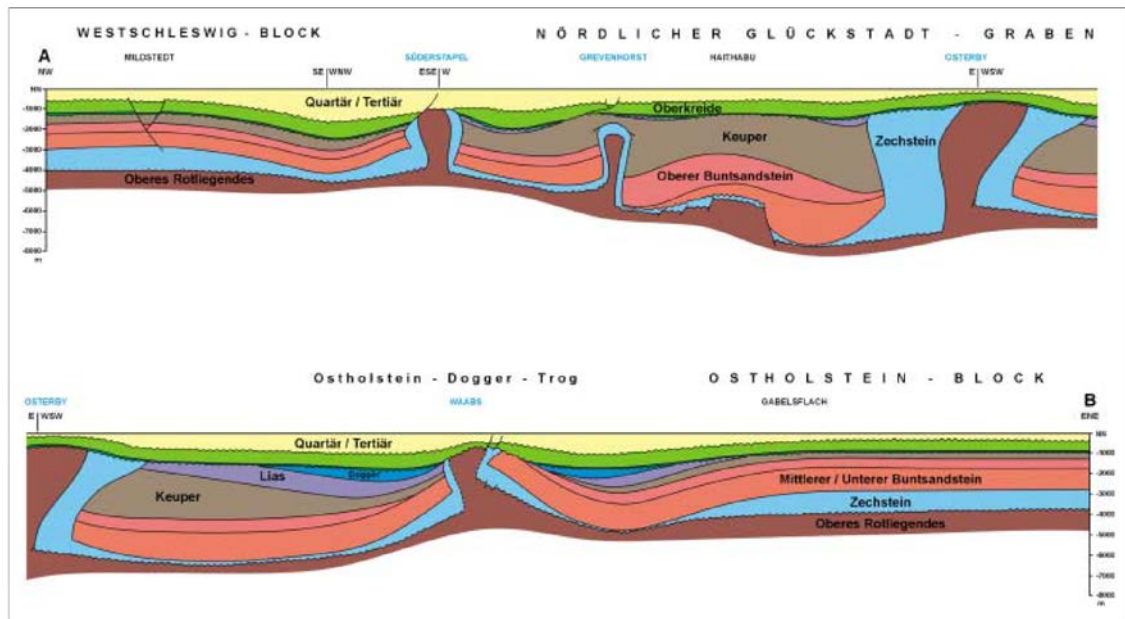


Abbildung 96: W-E Schnitt durch Schleswig-Holstein vom Westschleswig-Block über den (nördlichen) Glückstadt-Graben zum Ostholstein-Block (Baldschuhn et al. 2001)

Eine Auflistung dieser auch als „Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen“ bezeichneten Ergebnisflächen ist in Tabelle 206 zu finden.

Tabelle 206: Auflistung aller Gebiete in Schleswig-Holstein, die aus der Auswertung der Daten resultieren mit Angabe der Flächengröße. Flächen, die kleiner sind als 10 km², befinden sich an Bundeslandgrenzen und werden bei der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut auf die Erfüllung der Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft.

ID	Fläche [km ²]
SH_t_kru_1	1
SH_t_kru_2	1
SH_t_kru_3	1
SH_t_kru_4	2
SH_t_kru_5	5
SH_t_kru_6	7
SH_t_kru_7	10
SH_t_kru_8	10
SH_t_kru_9	10
SH_t_kru_10	11
SH_t_kru_11	11
SH_t_kru_12	11
SH_t_kru_13	12
SH_t_kru_14	13

ID	Fläche [km ²]
SH_t_kru_15	14
SH_t_kru_16	15
SH_t_kru_17	15
SH_t_kru_18	16
SH_t_kru_19	18
SH_t_kru_20	18
SH_t_kru_21	19
SH_t_kru_22	23
SH_t_kru_23	23
SH_t_kru_24	24
SH_t_kru_25	26
SH_t_kru_26	27
SH_t_kru_27	28
SH_t_kru_28	37
SH_t_kru_29	40
SH_t_kru_30	40
SH_t_kru_31	53
SH_t_kru_32	53
SH_t_kru_33	57
SH_t_kru_34	61
SH_t_kru_35	77
SH_t_kru_36	119

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 207 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 207: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei- ruppen- ID	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11839735	6220		3D_Basismodell_SH		Basis 3D-Modell SH (Hese et al. 2012)

DokID	Datei- ruppen- ID	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11884574	8906	2385811	Norddeutschland_West.mdb	Schichtenverzeichnisse: Glückstadt T 1 Krempe 2/1938 Offenseth 1	Bohrdatenbank Tonstudie; entscheidungserheblich: Tonanteilkategorie & kumulative Mächtigkeit (Hoth et al. 2007)

1.3.29 Oberkreide – Bayern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Oberkreide, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell das Wirtsgestein Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet der Einheit in Bayern.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Oberkreide erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Bayern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Kreide, Oberkreide

Die Oberkreide kann (vom älteren zum jüngeren) in folgende Stufen untergliedert werden: Cenomanium, Turonium, Coniacium, Santonium, Campanium, Maastrichtium. Ab dem Obercenomanium sind alle Stufen im Braunauer Trog und der Wasserburger Senke vertreten. Als potentiell Wirtsgestein-führende Stufen im Sinne der Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden für das Verbreitungsgebiet Bayern die Stufen des Turoniums (Mittel-Turonium), Coniacium und Santonium identifiziert.

Eine tabellarische Übersicht über die stratigraphischen Einheiten und deren lithologische Ausprägung der Oberkreide kann der tabellarischen Übersicht Bayern (Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Braunauer Trog und Wasserburger Senke (Freudenberger & Schwerd 1996)

Die Wasserburger Senke und der Braunauer Trog stellen zwei getrennte Sedimentbecken während der Kreide dar, die durch das Landshut-Neuöttinger Hoch separiert sind (Unger & Meyer 1996).

Fazies/Ablagerungsraum

Ab dem Obercenomanium entstanden im heutigen Ostmolassebereich zwei Becken, der Braunauer Trog und die Wasserburger Senke. Zwischen dem Nordrand des Alpen-Orogens und der Böhmisches Masse wurden während der Oberkreide neben Sanden und Flysch-Sedimenten auch Tone, Mergel und Kalke tiefmarinen Charakters abgelagert (Unger & Meyer 1996). Wassertiefen von bis zu 1000 m sind für den nördlichen Braunauer Trog während des höheren Santon bis Campan beschrieben (Meyer 2000).

Lithologie

- Das Mittel-Turonium der Wasserburger Senke wird dominiert von Tonmergelstein (Freudenberger & Schwerd 1996)
- Ablagerungen des Coniacium im Braunauer Trog werden dominiert von Tonmergelstein (40/150/60 m), dem Weilloher Sandstein (30 m – 40 m) sowie Mergelstein (50 m – 80 m). Aus der Wasserburger Senke sind Tonmergel- und Kalkmergelstein beschrieben (Freudenberger & Schwerd 1996).
- Während des Santonium wurden im Braunauer Trog wie in der Wasserburger Senke dunkelbraun- bis dunkelockergraue, schwach bis mäßig sandige Tonmergelsteine mit fein- bis mittelkörnigen Sandzwischenlagen sedimentiert (Unger & Meyer 1996).

Mächtigkeit

Die Sedimentgesteine des Turoniums im Braunauer Trog weisen eine Mächtigkeit von 47 m – 80 m auf. In der Wasserburger Senke sind Mächtigkeiten von 80 m – 150 m beschrieben (Freudenberger & Schwerd 1996).

Die Abfolge des Coniacium erreicht im Braunauer Trog 130 m und in der Wasserburger Senke insgesamt eine Mächtigkeit von maximal 201 m (Tonmergel 90 m – 150 m, Kalkmergel 23 m – 51 m) (Freudenberger & Schwerd 1996).

Im Braunauer Trog ist die Abfolge des Santonium 207 m mächtig. Mächtigkeiten des Santoniums der Wasserburger Senke sind zwischen 60 m und 160 m dokumentiert (Freudenberger & Schwerd 1996).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 208). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 208: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkung
1	BY	LfU	11877029/ 9006	ts/proj	GeoMol Übersichtsmodell	3D-Modell Molassebecken (GeoMol Team 2015)
2	BY	LfU	11877029/ 9010	ts/proj	GeoMol Teilgebiet Ost	3D-Modell östl. Molassebecken (GeoMol Team 2015)
3	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
4	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales-Gelände -Modell
5	BY	LfU	11842369_01/ 7862	pdf	\Geolog_Karten_Teil1\Erläuterungen\Erl_GK500	Erläuterungen zur Geologischen Karte (Freudenberger & Schwerd 1996)
6	BY	LfU	11842369_01/ 7862	pdf	\Geolog_Karten_Teil1\Erläuterungen\Erl_GK25	Erläuterungen zur Geologischen Karte (Doppler et al. 1982)
7	DE	BGR	11844870_01/ 6846	.pdf	BGR_Tonstudie2007	Studie der BGR (Hoth et al. 2007)

Eigenrecherche

Meyer (2000): Außeralpine Kreide in Süddeutschland. - In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Redaktion: M. Hiß & J. Mutterlose), Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland.

- Regionale lithologische Besonderheiten und Standardprofile der Oberkreide

Freudenberger & Schwerd (1996): Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000, 4. neubearbeitete Auflage. Bayerisches Geologisches Landesamt. 1996 (Vergleich Tabelle 3.4.-1 und Beilage 7 der GK_500 Erläuterungen).

- Regionale lithologische Besonderheiten der Oberkreide im Braunauer Trog und der Wasserburger Senke

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit Tiefenlage und Fläche der gesamten Kreide, in Bayern geprüft wurde, ist in Tabelle 209 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 209: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modell Molassebecken, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Oberkreide aus der Basisfläche „Top Oberer Jura“	b_KrO_BY.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_Macro.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit < 100 m löschen	b_KrO_BY_MACRORESULT
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	
h) Prüfung des Flächenbedarfs	
i) Export der Bearbeitungsfläche als DXF und der Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_KrO_BY.dxf MG_t_KrO_BY.txt

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
3. Literaturrecherche zur lithologischen Ausbildung der Oberkreide in Bayern	

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 219 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell ist das GeoMol-Übersichtsmodell des bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU)(GeoMol Team 2015). Das GeoMol-Modell wurde im Zuge eines grenzüberschreitendes EU-Projektes erstellt und beinhaltet 12 stratigraphische Einheiten (von Top Grundgebirge bis Basis Obere Meeresmolasse) sowie eine Topographiefäche. Das Modell betrachtet den Bereich des bayerischen Molassebeckens bis etwa dem Beginn der Fränkischen Alb. Folgende Flächen sind im GeoMol-Modell enthalten; ob als Basis- oder Topfläche ist dem Präfix B_ bzw T_ zu entnehmen:

- B_Q = Basis Quartär
- B_OSM = Basis Ob. Süßwassermolasse
- B_OMM = Basis Ob. Meeresmolasse
- B_OMME = Basis Ältere Ob. Meeresmolasse
- B_UMJ = Basis Jüngere Unt. Meeresmolasse
- B_UMA = Basis Ältere Unt. Meeresmolasse
- B_T = Basis Tertiär
- T_JU = Top Ob. Jura
- T_JM = Top Mittlerer Jura
- T_RJL = Top Rhaetium–Unterjura
- T_Tr = Top Trias
- T_B = Top Grundgebirge (Basement)

Der Ablagerungsraum der relevanten Einheiten der Oberkreide, der Wasserburger und Braunauer Senke (Hiß & Mutterlose 2000) wird vom GeoMol-Modell abgedeckt, sodass dieses für eine weitere Bearbeitung ausreichend ist. Von der Verwendung des östlichen Pilotprojektes des GeoMol-Modells wurde abgesehen, da der Umfang des Pilotprojektes nicht die beiden sedimentären Becken in Gänze umfasst. Die modellierten Flächen des

Übersichtmodells des GeoMol-Projektes scheinen nach cursorischer Prüfung in Bereiche des Pilotprojektes identisch zu den Flächen der Pilotprojekte zu sein.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 209 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Zur Anwendung der Mindestanforderungen durch 3D-Modelle wurde die Topfläche „Oberer Jura“ des GeoMol-Projektes als Bearbeitungsfläche für folgende Arbeitsschritte verwendet (Tabelle 209, 2b). Dies ist stratigraphisch zur Basis der Oberkreide die nächstgelegene modellierte Ausgangsfläche.

Das Digitale Geländemodell für Bayern wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 209, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 209, 2d). Bereiche, in denen Ober- und Unterkante der Einheit tiefer als 1500 m u. GOK liegen, werden so durch eine Null-Mächtigkeit gelöscht; in Bereichen, in denen nur die Unterkante tiefer als 1500 m u. GOK liegt, wird die Mächtigkeit zwischen 1500 m u. GOK und der Oberkante berechnet. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 209, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Oberkreide und der Topfläche berechnet (Tabelle 209, 2f). Die Topfläche setzt sich aus der Basisfläche des Tertiärs sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 209, 2c). Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner als 100 m wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche (Tabelle 219, 2g) wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden. Des Weiteren wurden im Bereich von Störungszonen 2D-Profilschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können.

Die resultierende Fläche wurde daraufhin auf den Flächenbedarf geprüft (Tabelle 209, 2h). Gebiete kleiner als 10 km² wurden entfernt.

Die Bearbeitungsfläche Oberkreide wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 219 2i).

2D-Bearbeitung

Eine detaillierte Recherche der Ausbildung der sedimentären Oberkreide wurde für die Bereiche des Braunauer Trog sowie der Wasserburger Senke durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst.

Die von Tonmergel, Mergel und Kalkmergel geprägten Ablagerungen des Braunauer Trog werden immer wieder durch Sandschüttungen vom Böhmischem Festland im Nordosten unterbrochen (Meyer 2000). Eben dort, im Nordosten des Braunauer Trog, zeigt das geologische 3D-Modelle auch die mächtigsten Ablagerungen der Kreide. Hier ist demnach allerdings mit einem erhöhten Eintrag von klastischem Sediment (v. a. Sandfraktion) zu rechnen. Lagenweise dominieren auch feinsandigen Tonmergel-Abfolgen. Ein bis zu 50 m mächtiger Sandstein-Horizont im mittleren Coniacum ist auf den Braunauer Trog beschränkt (Unger & Meyer 1996). Im Ober-Coniacium dominieren mächtige Mergel-Ablagerungen die Abfolgen im Braunauer Trog. Im Santonium wurden vor allem schwach bis mäßig sandige Tonmergel mit fein- bis mittelkörnigen Sandzwischenlagen abgelagert. Diese Art der Sedimentation setzt sich besonders auch im Braunauer Trog bis in das Campanium mit großen Mächtigkeiten fort.

Ablagerungen des Turonium der Wasserburger Senke werden dominiert von Mergelstein mit Tonmergelanteil, darüber folgen sandfreie Tonmergelsteine die auch Kalkmergelstein führen. Tonmergelsteine des Santonium mit Übergängen zum Sandmergel werden von Tonmergelstein des Campanium überlagert. Diese weisen erosionsbedingt stark unterschiedliche Mächtigkeit auf (Doppler et al. 1982).

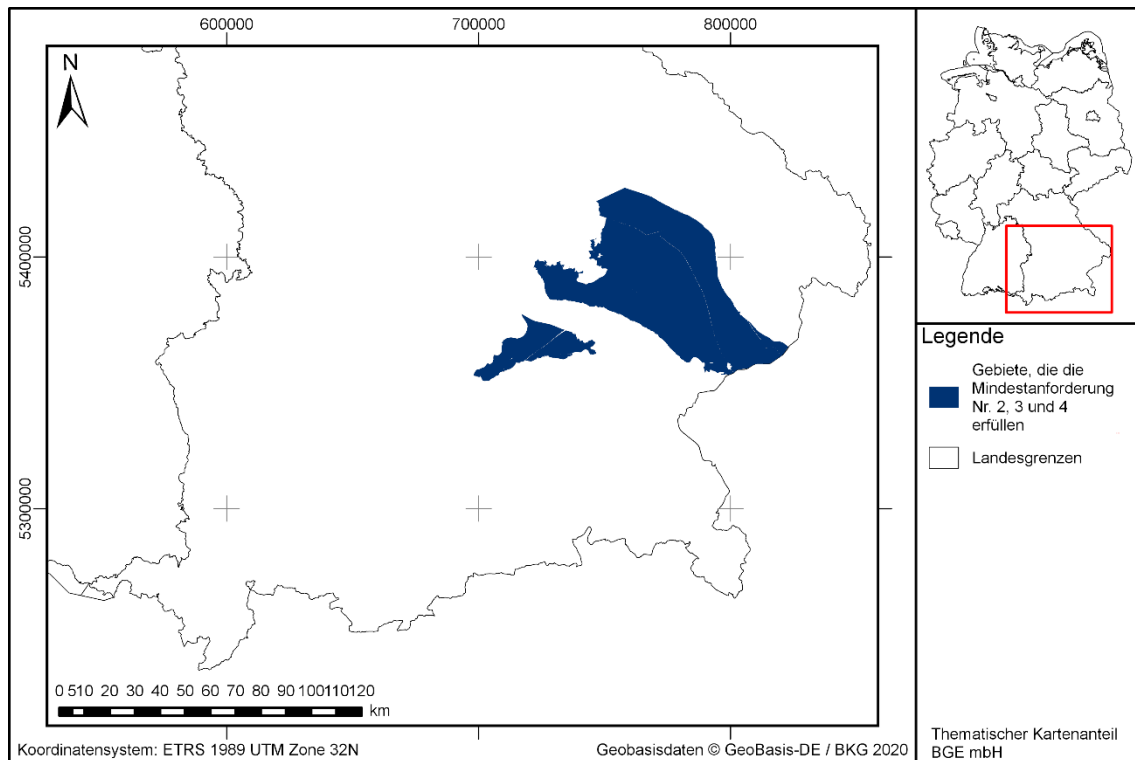


Abbildung 97: Überblick über das Modellierergebnis. Die Landesgrenze Bayerns ist in schwarz abgebildet. Gebiete, die die Mindestanforderungen Nr. 2, 3 und 4 erfüllen, sind in blau dargestellt.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Lithologisch werden die Stufen des Turonium (Mittel-Turonium), Coniacium und Santonium allgemein als tonig-mergelige Abfolgen beschrieben (Unger & Meyer 1996). Ton-dominierte Abfolgen der kontinuierlichen Reihe Kalkstein – Mergel – Tonstein können als potentielle Wirtsgesteine betrachtet werden. Insbesondere Formationen, die aus Mergeln und Mergeltonsteinen bestehen, erfüllen mit hoher Wahrscheinlichkeit die Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit (Hoth et al. 2007). Abfolgen von Tonmergelsteinen und Mergelsteinen hingegen erfüllen die geforderten Gebirgsdurchlässigkeiten dennoch teilweise (Hoth et al. 2007).

Bei genauerer Betrachtung sind die Abfolgen der Oberkreide des Braunauer Trogs und der Wasserburger Senke geprägt durch regional stark erhöhte Karbonatgehalte. Der Tonanteil dieser Abfolgen liegt überwiegend unter 65 % (Hoth et al. 2007), womit die Mindestanforderung nur bedingt erfüllt wird. Die zudem regional lithologisch heterogen ausgebildeten Abfolgen von Tonmergel und Mergel werden insbesondere im Braunauer Trog durch regional auftretende sandige Lagen unterbrochen. Sowohl die Abfolgen des

Braunauer Troges als auch der Wasserburger Senke enthalten immer wieder feinsandige und stark kalkhaltige Tonmergel, die keine ausreichend geringen Gebirgsdurchlässigkeiten erwarten lassen.

Es kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass sich in den mergeligen und tonmergeligen Abfolgen der Oberkreide des Braunauer Trogs, bzw. der Wasserburger Senke Gebiete befinden, die ausreichend mächtiges, homogenes Wirtsgestein enthalten. Insgesamt ist jedoch davon auszugehen, dass die Formationen der Oberkreide den für die Erfüllung der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit nötigen Tonanteil nicht aufweist. Daher kann die Annahme getroffen werden, dass die Abfolge der Oberkreide in Bayern die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit **nicht erfüllt**.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestanforderung Nr. 2 „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wurde mit Hilfe des geologischen 3D-Modells GeoMol bearbeitet. Hierzu wurde die stratigraphische Mächtigkeit zwischen der Bearbeitungsfläche und der Topfläche als Befehl *Compute_distance to surface*. Bereiche die kleinere Mächtigkeiten als 100 m aufweisen wurden gelöscht. Somit weisen die Flächen in Abbildung 97 dargestellt sind, Mächtigkeiten der Kreide über 100 m vor. Stratigraphisch genauer lässt sich das potentielle Wirtsgestein nicht abbilden, da zur weiteren Einengung die Daten im Modell fehlen. Bereiche, in denen die Kreide keine 100 m Mächtigkeit aufweist, können auch kein über 100 m mächtiges Wirtsgestein der Oberkreide enthalten. Die Mächtigkeiten werden im Braunauer Trog zum Böhmischem Massiv im Nordosten größer werden. Innerhalb des Braunauer Trogs können Mächtigkeiten von über 900 m angetroffen werden. Verbleibende Gebiete (größer als 100 m Mächtigkeit) in der Wasserburger Senke zeigen Mächtigkeiten bis ca. 260 m. In den Gebieten, die in Abbildung 97 dargestellt sind, werden Mächtigkeiten über 100 m durch das Modell bestätigt und dort gilt somit die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt**.

Mindestanforderung „Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Fläche der Kreide wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells (DGM) geprüft. Die Bereiche, die oberhalb von 300 m wurden entfernt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde. Insbesondere potentielle Verbreitungsgebiete der Kreide in der Wasserburger Senke liegen überwiegend tiefer als 1500 m u. GOK, sodass das verbleibende Gebiet (größer als 100 m Mächtigkeit) nur im Norden im Nahbereich des Landshuter-Neuöttinger Hochs auftritt. Die Kreideablagerungen im Braunauer Trog liegen überwiegend

zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK. In den Gebieten, die in Abbildung 97 dargestellt werden, liegt der betrachtete geologische Bereich in entsprechender Tiefe und somit gilt dort die Mindestanforderung „Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt**.

Mindestanforderung „Flächenbedarf“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt. Die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für das Wirtsgestein Tongestein der Oberkreide Bayerns **nicht erfüllt** ist. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die Anforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG für die hier betrachteten Gesteinsabfolgen die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erfüllen, kommen die hier betrachteten Einheiten der Oberkreide in Bayern nicht als Gebiet(e) für einen Endlagerstandort in Betracht.

Studien, die sich mit der Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen, die als Barrieregestein (z. B. Speicherkataster, Reinhold et al. 2011) oder Wirtsgestein für die Endlagerung stark Wärme entwickelnder hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland geeignet sind (z. B. Hoth et al. 2007), befassen, weisen ebenfalls auf die Karbonatgehalte sowie eingeschaltete Sandhorizonte hin (Reinhold et al. 2011), die nicht ausreichende Gebirgsdurchlässigkeiten zur Folge haben. Hoth et al. (2007) betrachten die Oberkreideablagerungen Bayerns zudem nicht als eine Wirtsgesteinsoption für die Endlagerung, da sowohl der Ton- /Tonsteinanteil meist nur 65 % beträgt als auch von einer starken faziellen Variabilität der Ablagerungen auszugehen ist. Diese Einschätzungen scheinen plausibel und erlauben, die Mindestanforderung Nr.1 als nicht erfüllt anzusehen. Demnach können in den Ablagerungen der Oberkreide in Bayern keine Gebiete identifiziert werden, die alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfüllen.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 210 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 210: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11877029	9006		Übersichtsmodell GeoMol Bayern		3D-Modell
1842369_01	7862		Geolog_Karten_Teil1\Erläuterungen\Erl_GK25		Erläuterungen zur Geologischen Karte

Meyer, R.K.F. (2000): Außer-alpine Kreide in Süddeutschland. - In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Redaktion: M. Hiß & J. Mutterlose), Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland.

- Faziesschnitte vom Braunauer Trog und der Wasserburger Senke

1.3.30 Oberkreide – Brandenburg, Berlin, Sachsen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Oberkreide, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Brandenburg, Berlin und Sachsen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Oberkreide erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeiten- oder paläogeographische Karten) zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse dargestellt. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Brandenburg, Berlin und Sachsen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Die Oberkreide ist in sechs Stufen untergliedert: Cenomanium, Turonium, Coniacium, Santonium, Campanium und Maastrichtium. Die Emscher-Formation wird dem Mittel-Coniacium bis Unter-Campanium zugeordnet.

Eine tabellarische Übersicht der Einheiten der Oberkreide mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in den zuvor erstellten Inventarisierungstabellen Brandenburg und Sachsen (Kapitel 5) zu finden.

Geographische Verbreitung

Das Verbreitungsgebiet der Oberkreide in Brandenburg erstreckt sich über die Nord- und Ostbrandenburg-Senke bis zur Nordsudetischen Senke im Süden. Von diesem Gebiet durch den Prignitz-Lausitzer Wall getrennt, finden sich im Westen an der Grenze zu Sachsen-Anhalt die Oberkreide-Vorkommen des Altmark-Beckens (Voigt 2015). Die Tonmergelsteine der Ostbrandenburg-Senke setzen sich im Süden nach Sachsen in die Nordsudetische Senke fort. Darüber hinaus ist die Verbreitung der Oberkreide in Sachsen auf die Elbtal- und Zittauer Kreide beschränkt (Tröger 2011).

Fazies/Ablagerungsraum

Während die nördlichen Gebiete in Schreibkreide-Fazies abgelagert wurden, traten in den südlichen Bereichen verschiedene Sedimentationsbedingungen während der Oberkreide auf, die zu lithologisch variablen Ablagerungen geführt haben (Musstow 1976a).

Lithologie (Tröger 2011; Voigt 2015)

Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) wird für die Oberkreide in Brandenburg die Emscher-Formation betrachtet. In Sachsen sind die Sedimente des Mittel-Turonium bis Santonium als mögliche geeignete Tongesteinsformationen von Bedeutung. Die weiteren Einheiten der Oberkreide wurden aufgrund ihrer Lithologie nicht als geeignete Tongesteinsformation eingestuft.

Die Emscher-Formation ist in Brandenburg und Berlin aus monotonen siltigen Mergeln und Tonmergelsteinen aufgebaut, die außer Bioturbation keine Schichtungsmerkmale aufweisen. Im Südosten von Brandenburg treten erhöhte Sandgehalte auf. Im Norden besteht die Emscher-Formation aus Schreibkreide, die sich zwischen Berlin, Bad Freienwalde und Frankfurt/Oder mit Tonmergeln verzahnt. Im Süden der Ostbrandenburg-Senke finden sich Tonmergelsteine.

In der Nordsudetischen Senke in Sachsen wurden vom Mittleren Turonium bis Mittleren Santonium Tonmergelsteine und kalkhaltige Tongesteine abgelagert. Im Osten treten zudem Sandsteine und Siltsteine auf. In der Elbtal- und Zittauer Kreide ist die Ausprägung der Oberkreide zu großen Teilen sandig und mergelig.

Mächtigkeit (Tröger 2011; Voigt 2015)

Die Mächtigkeit der Emscher-Formation nimmt in Brandenburg von Norden nach Südosten von ungefähr 200 m auf ungefähr 300 m zu. Maximal treten Mächtigkeiten von 470 m auf. In der Nordsudetischen Senke können die Sedimente des Turonium, Coniacium und Santonium jeweils Mächtigkeiten von mehr als 200 m, maximal 470 m, erreichen.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 211). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 211: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales Gelände- Modell
3	BB	LBGR	11878605/ 7872		Brandenburg 3D	3D-Modell (Schilling et al. 2018)
4	DE	BGR	11844870_ 01/6846	pdf	BGR_Tonstu- die2007	PDF-Bericht Tonstu- die (Hoth et al. 2007)
5	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Norddeutsch- land_Ost	Bohrdatenbank Ost Tonstudie (Hoth et al. 2007)
6	BB	LBGR	11874780/ 156360	mdb	Endla- ger_BGE_300_frei_ dSV_Doku	Bohrdatenbank Brandenburg
7	BE	SEN UVK	11874598/ 7649	mdb	Bohrun- gen_ab_300m	Bohrdatenbank Ber- lin
8	SN	LfULG	11883871/ 8845, 8942	DBF	ga__neu, gsh_neu	Bohrdatenbank Sachsen
9	DE	BGR	11842726/ 7600	shp	140_kro_iso	Tiefenlage der Ober- kreide aus dem Southern Permian Basin Atlas (Doornenbal & Stevenson 2010)

Eigenrecherche

Zusätzlich zu den in Tabelle 211 aufgelisteten Daten wurden die lithologisch-paläogeographischen Karten der DDR der gesamten Oberkreide (Cenoman bis Maastricht; Musstow 1976a), des Turon (Musstow 1976c) und des Coniac bis Santon (Musstow 1976b) verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Oberkreide in Brandenburg und Berlin geprüft wurde, ist in Tabelle 212 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 212: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen.

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) beziehungsweise um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; BB_DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Oberkreide aus der Basisfläche B2-T2 (Transgressionsfläche Mittelalb bis Cenoman)	b_Oberkreide_BB.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Oberkreide_BB_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Oberkreide_BB_MACRORESULT_qs.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_kro_BB.dxf MG_t_kro_BB.txt
3. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 02_Oberkreide_Nord.aprx
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	BB_BE_t_kro_cut_300m_1500m_thickness100m.shp
b) Einladen und Georeferenzieren der lithologisch-paläogeographischen Karte der DDR der Oberkreide	Oberkreide Cenoman Maastricht.png
c) Vektorisieren der Verbreitungsgrenze der Schreibkreide-Fazies	SchreibkreideFazies_Ost.shp
d) Vektorisieren der Verbreitung der gesamten Oberkreide mit einer Mächtigkeit größer als oder gleich 100 m in Nordost-Sachsen	Verbreitung_kro_SN_100m.shp
e) Verschneiden der Flächen aus dem 3D-Modell mit den vektorisierten Flächen/Grenzen aus 3c und 3d der lithologisch-paläogeographischen Karte	BB_BE_SN_t_kro.shp
f) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	BB_SN_t_kro_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 212 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell Brandenburg 3D (B3D) wurde vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) in Zusammenarbeit mit dem Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) entwickelt. Das Modellgebiet umfasst die Bundesländer Berlin und Brandenburg und enthält 12 reflexionsseismische Horizonte (Schilling et al. 2018):

- T1 (Transgressionsfläche Känozoikum)
- B2-T2 (Transgressionsfläche Mittelalb bis Cenoman)
- T3-T4 (Transgressionsfläche Unterhalb bis Wealden)

- E1-E2 (Intra-Oxford bis Kimmeridge)
- L1 (Intra-Toarc)
- K2 (Top Oberer Gipskeuper)
- M1 (Intra-Hauptmuschelkalk)
- S1 (Top Salinarröt)
- X1 (Top Zechsteinsalinar)
- Z1 (Top Unterer Staßfurtanhydrit)
- Z3 (Basis Werraanhydrit)
- R6 (Basis Oberrotliegend II)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 212 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Als Bearbeitungsfläche Oberkreide wurde die Basisfläche B2-T2 (Transgressionsfläche Mittelalb bis Cenoman) aus dem 3D-Modell verwendet (Tabelle 212, 2b).

Das digitale Geländemodell für Brandenburg und Berlin wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 212, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 212, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 212, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Oberkreide und der Topfläche berechnet (Tabelle 212, 2f). Die Topfläche setzt sich aus der Basisfläche T1 (Transgressionsfläche Känozoikum) sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 212, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Falls in dem Bearbeitungsgebiet 3D-gepufferte Störungen vorhanden sind, wurde für diese ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert (vgl. BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde (Ta-

belle 212, 2g). Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten wurden (Tabelle 212, 2h).

Die Bearbeitungsfläche Oberkreide wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 212, 2i).

2D-Bearbeitung

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der gesamte Datensatz in einzelne Flächen getrennt, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft werden konnte (Tabelle 212, 3a). Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² (BT-Drs. 18/11398) wurden entfernt (Tabelle 212, 3f).

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bilden die Arbeiten von Voigt (2015) aus der „Geologie von Brandenburg“ zur Verbreitung der Oberkreide in Brandenburg sowie von Tröger (2011) aus der „Geologie von Sachsen I“ zur Oberkreide in Sachsen. Unterstützend fanden die „Tonstudie der BGR“ (Hoth et al. 2007) und die Ausführungen von Reich (2000) in der „Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland“ (Hiß & Mutterlose 2000) Anwendung.

Karten

Die Fläche der Oberkreide aus dem 3D-Modell wurde mit der „Lithologisch-paläogeographischen Karte der DDR, Cenoman bis Maastricht“ (Musstow 1976a) verschnitten, um die in Schreibkreide-Fazies abgelagerten Sedimente im Norden von den tonig-mergeligen Sedimenten im Süden zu trennen (Tabelle 212, 3e). Die Trennung erfolgte entlang der Linie „südliche Verbreitungsgrenze der Schreibkreide und Kreidekalksteine“ und es wurde nur der Teil südlich dieser Grenze weiter betrachtet.

Da für den sächsischen Teil der nordsudetischen Senke kein 3D-Modell für die Horizonte der Oberkreide vorhanden ist, wurde die Verbreitung in Sachsen anhand der 100-m-Mächtigkeitslinie der „Lithologisch-paläogeographischen Karte der DDR, Cenoman bis Maastricht“ (Musstow 1976a) entnommen.

Die Karten des Turon und Cenoman bis Santon wurden für die Beurteilung der Lithologie in den verschiedenen Regionen Brandenburgs und Sachsens herangezogen. Der westliche Teil des Verbreitungsgebiets der Oberkreide in Brandenburg (südöstliches Altmark-Becken) wurde aufgrund der sandig-siltigen Ausbildung und Heterogenität nicht weiter

berücksichtigt. Dieser wurde in Tabelle 212, Bearbeitungsschritt 3e aus der Gesamtfläche entfernt.

Um die Tiefenlage der Oberkreide in Sachsen abzuschätzen, wurde auf die Isolinien der Oberkreide-Basis und der Tertiär-Basis des Southern Permian Basin Atlas (Doornenbal & Stevenson 2010) zurückgegriffen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse der Bundesländer Brandenburg, Berlin und Sachsen (siehe Tabelle 212 und Tabelle 214) wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen der Oberkreide geprüft.

Die für die Erstellung der Tonstudie von Hoth et al. (2007) verwendeten Bohrungsdaten (DokID: 11884574, 8906) wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation der Oberkreide und die Tiefenlage zwischen 300 m u. GOK und 1500 m u. GOK innerhalb der Landesgrenzen von Brandenburg geprüft. Zusätzlich wurden die digitalen Bohrdatenbanken des LBGR Brandenburg und der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (SEN UVK) Berlin sowie das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) Sachsen auf Tongesteine in den Schichten der Oberkreide geprüft.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen Zusammensetzung und der Textur beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen. Lithotypen, denen Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die die Anforderung an Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Hoth et al. (2007) weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Die Emscher-Formation ist in Brandenburg im Süden in weiten Bereichen von Tonmergelstein dominiert, während im Norden Kalksteine und Schreibkreide vorherrschen (Voigt 2015; Reich 2000). Die ausgewerteten Bohrdaten von Brandenburg und Berlin bestätigten diese Einschätzung. Im Südwesten treten neben Sand- und Siltsteinen siltige

Tonmergelsteine auf (Voigt 2015; Musstow 1976b; Reich 2000), die die nötige Gebirgsdurchlässigkeit wahrscheinlich nicht erfüllen. Die im Süden des Ostbrandenburg-Bekens vorhandenen Tonmergelsteine (Voigt 2015; Musstow 1976b) lassen hingegen Tonanteile erwarten, die die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit wahrscheinlich erfüllen.

Im Nordwesten der Nordsudetischen Senke sind die Sedimente des Coniacium und Santonium zwar teilweise stark sandig ausgeprägt (Tröger 2011; Voigt 2015; Musstow 1976b), aber die Tonmergel- und Tonsteine des Turonium (Tröger 2011; Musstow 1976c) erfüllen mit großer Wahrscheinlichkeit die Voraussetzungen an die Gebirgsdurchlässigkeit.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein in der Oberkreide im Südosten Brandenburgs und in Sachsen in der Nordsudetischen Senke **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit der Oberkreide wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit der Oberkreide zwischen dem Mittelalb/Cenoman bis zum Top Kreide zusammen. Als geeignete Tongesteinsformation wurde für Brandenburg und Berlin jedoch lediglich die Emscher-Formation ausgewiesen. Es ist daher anzunehmen, dass nur in Teilen des ausgewiesenen Gebiets eine Mächtigkeit des Tongesteins von 100 m erreicht wird. Dennoch werden für die angegebenen Formationen in den betrachteten Gebieten Mächtigkeiten von zum Teil deutlich mehr als 100 m beschrieben (siehe Geologischer Überblick). Zum jetzigen Zeitpunkt kann jedoch keine weitere Eingrenzung vorgenommen werden.

In Sachsen wurde die Oberkreide-Verbreitung der Karte „lithologisch-paläogeographische Karte der DDR, Cenoman bis Maastricht“ (Musstow 1976a) entnommen und dabei die Verbreitungslinie auf der Karte verwendet, die eine Mächtigkeit von 100 m anzeigt. Diese gilt jedoch, wie auch die Fläche für Brandenburg aus dem 3D-Modell, für die gesamte Oberkreide. Die ausgewiesene Fläche ist daher nicht mit Bereichen, in denen Tongesteine des Mittel-Turon bis Santon in ausreichender Mächtigkeit auftreten, gleichzusetzen.

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird als zunächst **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Oberkreide wurde für Brandenburg anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde.

Für Sachsen wurden Informationen über die Tiefenlage der Oberkreide-Schichten aus dem „Southern Permian Basin Atlas“ (Doornenbal & Stevenson 2010) entnommen. Anhand der Tiefenlinien konnte abgeschätzt werden, dass die ausgewiesenen Gebiete größtenteils in dem geforderten Tiefenbereich liegen. Da die Tiefen u. NN statt u. GOK angegeben sind, wurde anhand dieser Tiefenlinien jedoch keine Eingrenzung der Flächen vorgenommen.

Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher als zunächst **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort in Betracht zu ziehen, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Dies trifft auf Gebiete im Südosten Brandenburgs und im Nordosten Sachsens zu. In Berlin existieren keine Gebiete, die alle Mindestanforderungen erfüllen.

Ergebnis

Eine Auflistung der Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 213 zu finden. In Abbildung 98 ist das Ergebnis der Anwendung der Mindestanforderungen für die Einheit Oberkreide in Brandenburg und Sachsen dargestellt. Abbildung 99 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge eines Teils des ausgewiesenen Gebiets.

Tabelle 213: Auflistung aller Gebiete in Brandenburg und Sachsen, die die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Flächengrößen.

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_kro_BB_SN_1	1201
MG_t_kro_BB_SN_2	545
MG_t_kro_BB_SN_3	128
MG_t_kro_BB_SN_4	105

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_kro_BB_SN_5	84
MG_t_kro_BB_SN_6	69
MG_t_kro_BB_SN_7	36

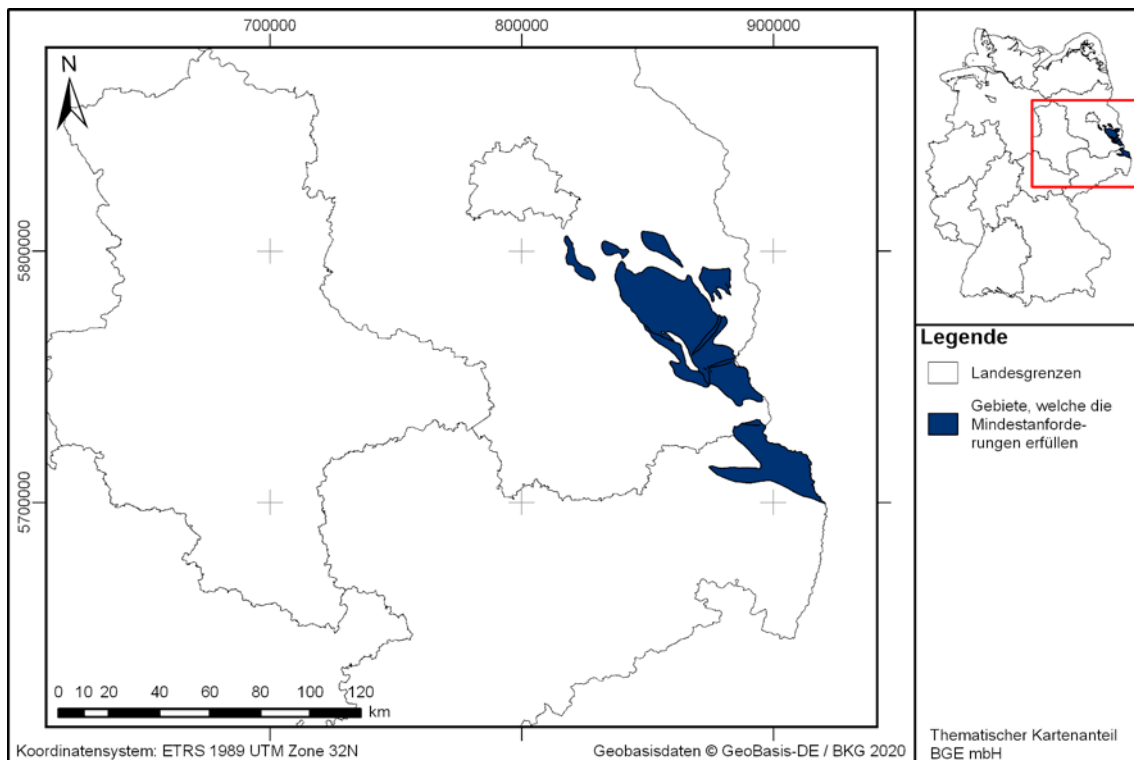


Abbildung 98: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Brandenburg und Sachsen. Die blaue Fläche zeigt innerhalb der Ostbrandenburg-Senke und der Nordsudetischen Senke das Gebiet, das die Mindestanforderungen erfüllt

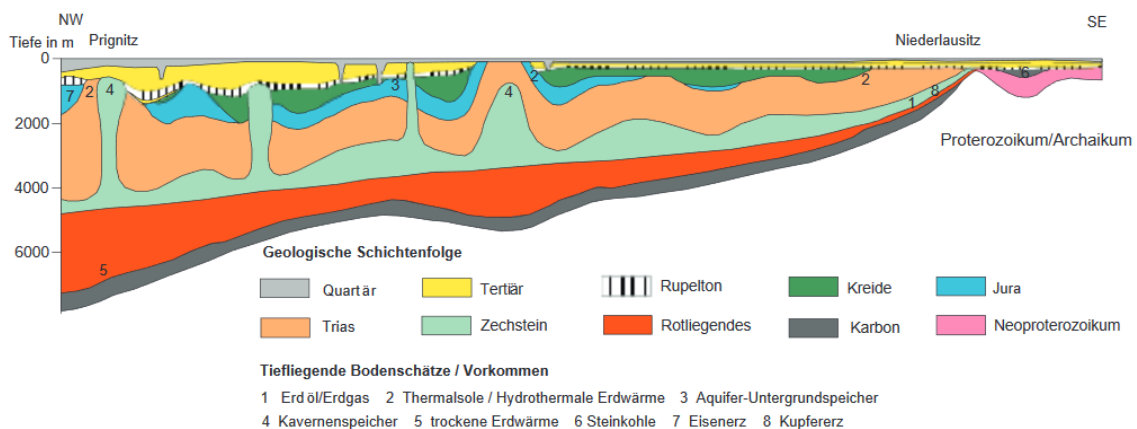


Abbildung 99: Profilschnitt durch Brandenburg von Prignitz bis in die Niederlausitz. Aus (Stackebrandt 2010).

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 214 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 214: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11878605	7872		Brandenburg 3D		3D-Modell
11884574	8906	2385810	Norddeutschland_Ost.mdb	Schichtenverzeichnisse Fehrbelin 1/72, Kotzen 5/74, Gransee 2/67, Rambow 17/70, Pritzwalk 1E/58, Fürstenwalde/Spree 1/88, Flieth 1/64, Angermünde 2/86, Lausitz 108/62, Gorgast 1/1a/70, Lakoma 3/78	Bohrungen Tonstudie (Hoth et al. 2007)
11874780	156360	156360	Endlager_BGE_300_freie_dSV_Doku.mdb	Schichtenverzeichnisse Kb Df 1/53, Kb Doi 4/60, Kb Fo 1/61, Kb Hbrü 1/61, Kb Kse 1E/63, Kb Lhz 1/60, Kb WrdfFu 1/61	Bohrungen Bohrdatenbank Brandenburg
11883871	8942	2384503	gsh_neu.DBF	Schichtenverzeichnisse B....1....2000, B....8....1958, B..101....1961, B....2....1959	Bohrungen Bohrdatenbank Sachsen

Entscheidungserhebliche Daten aus Eigenrecherche:

Karte „Oberkreide: Cenoman bis Maastricht 1:500.000“ (Musstow 1976a):

- Verbreitungsgrenze „südliche Verbreitungsgrenze der Schreibkreide und Kreidekalksteine“
- „Isolinie der heutigen Mächtigkeit“, 100 m, für den Bereich in Nordost-Sachsen (in etwa zwischen Görlitz und Cottbus)

Karte „Oberkreide: Turon 1:500.000“ (Musstow 1976c):

- Lithologie (Grundgesteine, Gemengteile, Profilaufbau) im gesamten Gebiet Brandenburg, Nordost-Sachsen und östliches Sachsen-Anhalt

Karte „Oberkreide: Coniac und Santon 1:500.000“ (Musstow 1976b):

Lithologie (Grundgesteine, Gemengteile, Profilaufbau) im gesamten Gebiet Brandenburg, Nordost-Sachsen und östliches Sachsen-Anhalt

1.3.31 Oberkreide – Niedersachsen, Bremen, Hamburg

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Oberkreide, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Niedersachsen, Hamburg und Bremen. Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die stratigraphische Einheit Oberkreide erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse dargestellt. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, Hamburg und Bremen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Die Oberkreide ist in sechs Stufen untergliedert: Cenomanium, Turonium, Coniacium, Santonium, Campanium und Maastrichtium. Alle Stufen kommen in Niedersachsen vor.

Eine tabellarische Übersicht der Einheiten der Oberkreide mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der zuvor erstellten Inventarisierungstabelle Niedersachsen (Kapitel 5) zu finden.

Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) wird für die Oberkreide in Niedersachsen die Stemwede-Formation betrachtet. Die potentiell geeigneten Gesteine befinden sich nur im unteren Teil der Formation, im Dielingen-Member. Die weiteren Einheiten der Oberkreide wurden aufgrund ihrer Lithologie nicht als geeignete Tongesteinsformationen eingestuft.

Die Emscher-Formation wurde als geeignete Tongesteinsformation in Nordrhein-Westfalen identifiziert. Deren Verbreitung setzt sich in einer kleinen Fläche nach Niedersachsen fort, wird jedoch im Modellierprotokoll der Oberkreide in Nordrhein-Westfalen abgehandelt.

Geographische Verbreitung

Im gesamten norddeutschen Raum ist die Oberkreide durch Ablagerungen von mächtigen Schreiekreide-Folgen geprägt, die unter tertiären und quartären Ablagerungen von meist mehreren hundert Metern Mächtigkeit liegen. Nur lokal treten Schichtlücken und Flachwasserbildungen an Salzstrukturen auf (Schönfeld et al. 2000). Im südlichen Niedersachsen ist die Oberkreide nicht flächendeckend erhalten und in sehr verschiedenartiger Kalk-, Mergel- oder sandiger Fazies ausgebildet. Die Ablagerungen treten im Süden Niedersachsens oft nur unter geringer Abdeckung oder als Aufschluss auf (Niebuhr et al. 2000).

Da die Stewede-Formation nur im südlichen Teil Niedersachsens verbreitet ist, sind in Hamburg und Bremen keine Vorkommen zu erwarten.

Lithologie (Dölling et al. 2018)

Der untere Teil der Stewede-Formation (Dielingen-Member) enthält vorwiegend Tonmergelsteine, die schwach sandig und stark glaukonitisch ausgeprägt sind. Untergeordnet treten Kalkmergelsteine auf. An der Basis findet sich zum Teil das Dammer Eisenerz, ein Transgressionskonglomerat aus unterkretazischen Tonsteingeoden. Der obere Teil der Stewede-Formation (Haldem-Member) besteht aus kieselreichem, sandigem Kalkmergelstein bis Mergelkalkstein.

Mächtigkeit (Dölling et al. 2018)

Die mittlere Mächtigkeit des Dielingen-Members beträgt zwischen 50 m und 70 m. In Bohrungen wurden maximale Mächtigkeiten von 120 m angetroffen. Das Haldem-Member weist mittlere Mächtigkeiten von bis zu 110 m auf.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 215). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 215: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datengruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	NI	LBEG	11842295/ 7775	ts	BGE-GTA3D	3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Daten format	Dateiname	Beschreibung
2	HH	BUE	11880284/ 8434	ASCII/ts	Tiefenmodell Hamburg	3D-Modell von Ham- burg mit 2 Basisflächen und einer Topfläche
3	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_m esh_tol10	Digitales Geländemo- dell
4	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsge- biete (VG250)	Bundesländergrenzen inkl. 12-Seemeilen- Zone
5	DE	BGR		pdf	InSpEE-Be- richt_2016	PDF-Bericht InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
6	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturum- risse_500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
7	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturum- risse_1000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
8	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturum- risse_1500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
9	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturum- risse_2000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
10	DE	BGR	11844870_ 01/6846	pdf	BGR_Tonstu- die2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
11	DE	BGR	2385810/8 906	mdb	Norddeutsch- land_West	Bohrdatenbank Tonstu- die (Hoth et al. 2007)
12	DE	LBEG	11881514	pdf		Schichtenverzeichnisse der Kohlenwasserstoff- Bohrdatenbank

Eigenrecherche

Es wurden keine weiteren Daten verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Oberkreide in Niedersachsen geprüft wurde, ist in Tabelle 216 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 216: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Oberkreide aus der Basisfläche Oberkreide 08_kro (aus allen Kacheln)	b_Oberkreide_NI.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Oberkreide_NI_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Oberkreide_NI_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_kro_NI.dxf MG_t_kro_NI.txt
3. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 02_Oberkreide_Nord.aprx
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	NI_08_kro_Maechtigkeiten_ab_100m.shp
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	NI_t_kro_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 216 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D, Bombien et al. 2012) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell ist die digitale Umsetzung des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = Digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tp1 = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden

- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg ab, sowie weite Teile von Niedersachsen bis auf den südlichen Bereich ab Höhe Göttingen. Die Flächen des GTA3D sind in 42 Kacheln untergliedert.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 216 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen kachelweise (in Kartenblätter unterteilt) vor, daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Oberkreide-Basisflächen (08_kro) erzeugt (Tabelle 216, 2b). Allerdings treten an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermaschung) auf.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 216, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 216, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 216, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Oberkreide und der Topfläche berechnet (Tabelle 216, 2f). Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Tertiär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 216, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Maechtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Maechtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 216, 2h). Des Weiteren wurden im Bereich von Salzstrukturen und Störungszonen 2D-Profileschnitte angelegt, um somit den räumlichen und geologischen Strukturaufbau in der endlagerrelevanten Tiefe ermitteln zu können. Darauf basierend wurde die Bearbeitungsfläche mit der Lokalität von Salz in steiler Lagerung verglichen und ausgewiesene Bereiche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, herausgeschnitten.

Die Bearbeitungsfläche Oberkreide wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 216, 2i).

2D-Bearbeitung

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der gesamte Datensatz in einzelne Flächen getrennt, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft werden konnte (Tabelle 216, 3a). Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² (BT-Drs. 18/11398) wurden entfernt (Tabelle 216, 3b). Da Hamburg und Bremen gemeinsam mit Niedersachsen bearbeitet wurden, gehen die entsprechenden Gebiete dort über die Bundeslandgrenzen hinweg.

Allgemeine Literatur

Neben der bereits erwähnten Literatur wurden die Arbeiten von Niebuhr et al. (2000) und Schönfeld et al. (2000) aus der „Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland“ (Hiß & Mutterlose 2000) zur Bewertung der Lithologie der Gesteine der Oberkreide verwendet. Unterstützend fand die „Tonstudie der BGR“ (Hoth et al. 2007) Anwendung.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen der Oberkreide geprüft.

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation der Oberkreide und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Landesgrenzen von Niedersachsen geprüft. Zusätzlich wurden in den Gebieten, die nicht durch die Bohrungen der Tonstudie abgedeckt waren, Schichtenverzeichnisse aus der Kohlenwasserstoff-Bohrdatenbank auf Tongesteine der Oberkreide durchsucht. Einzelne, für die Bewertung relevante Bohrungen sind in Tabelle 217 aufgelistet.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen. Lithotypen, denen Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die die Anforderung an Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Hoth et al. (2007) weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Literatur und Bohrungsdaten zeigen, dass die Oberkreide in den meisten Teilen Niedersachsens stark kalkhaltig ausgeprägt ist und keine Tongesteine vorhanden sind. Die Verbreitung der Stemwede-Formation beschränkt sich in Niedersachsen auf den südlichen Teil (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016), wo die Oberkreide oft nur als eingesunkene Erosionsrelikte in den Randsenken der Salzstrukturen vorhanden ist (Niebuhr et al. 2000). Aus dem Modell geht hervor, dass im südlichen Niedersachsen nur kleine Gebiete die Tiefen- und Mächtigkeitsanforderungen erfüllen. In keinem dieser Gebiete wurde jedoch in den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen ein Hinweis auf geeignete Tongesteine der Oberkreide gefunden.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein in der Oberkreide in Niedersachsen **nicht erfüllt** ist.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort in Betracht zu ziehen, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen die Anforderung nach § 23 Abs. 5 StandAG für die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit nicht erfüllen, werden für die Gesteine der Oberkreide keine Gebiete in Niedersachsen, Hamburg und Bremen ausgewiesen. Davon ausgenommen ist eine kleine Fläche an der Grenze zu Nordrhein-Westfalen, die im Modellierprotokoll der Oberkreide von Nordrhein-Westfalen ausgewiesen wird.

Ergebnis

Im Rahmen der Bearbeitung wurden alle Gebiete ausgeschlossen, welche ein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die zusätzlich alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die hier betrachteten Gesteinsformationen nicht alle Mindestanforderungen

erfüllen, werden für die Gesteine der Oberkreide keine Gebiete in Niedersachsen, Hamburg und Bremen ausgewiesen. Davon ausgenommen ist eine kleine Fläche an der Grenze zu Nordrhein-Westfalen, die im Modellierprotokoll der Oberkreide von Nordrhein-Westfalen ausgewiesen wird.

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 217 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 217: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei-gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11842295	7775		BGE-GTA3D		3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
2385810	8906	2385811	Norddeutschland_West.mdb	Schichtenverzeichnisse Krummendeich 1/1939, Oidershausen-Dogger 1/1964, Volkensen 3/1957, Volkwardingen 2/1955, Vorhop-Knesebeck 51/1987, Metzingen-Dannenberg 1/1972, Eystrup 2/1960, Lehrte 11/1951	Bohrungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007)
11881514	9108	2451589	016965000201SV.pdf	Schichtenverzeichnis Ostbevern 2	Bohrung Kohlenwasserstoff-Bohrdatenbank
11881514	9108	2451584	016904600131SV.pdf	Schichtenverzeichnis Bad Laer Z1	Bohrung Kohlenwasserstoff-Bohrdatenbank
11881514	9108	2452080	058274107101SV.pdf	Schichtenverzeichnis Rühme 71	Bohrung Kohlenwasserstoff-Bohrdatenbank
11881514	9108	2452078	058274106901SV.pdf	Schichtenverzeichnis Rühme 69	Bohrung Kohlenwasserstoff-Bohrdatenbank

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11881514	9108	245204 7	058009600201 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Broistedt 2	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245205 0	058009604002 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Broistedt 40 + 40a	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245204 8	058009603401 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Broistedt 34	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245131 6	014145200631 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Klosterseele Z6	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245154 0	015180400932 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Staffhorst Z9	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245124 7	013516700231 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Doettingen-Ost Z2	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245238 5	102093020241 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Wilsum S 202	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245240 5	103033500231 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Hebelermeer Z2	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245120 2	012389000101 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Vrees 1	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245120 1	012379500201 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Sögel 2	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245122 8	013506500231 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Bethermoor Z2	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245123 2	013509400431 SV.pdf	Schichtenverzeichnis Brinkholz Z4	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank
11881514	9108	245134 4	01470210990 1_SV.pdf	Schichtenverzeichnis Aldorf 99	Bohrung Kohlen- wasserstoff-Bohr- datenbank

1.3.32 Oberkreide – Nordrhein-Westfalen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Emscher-Formation der Oberkreide, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Nordrhein-Westfalen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die geologischen Einheiten der Emscher-Formation erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage. Ergänzend wurden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Nordrhein-Westfalen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Die Oberkreide ist in sechs Stufen untergliedert: Cenomanium, Turonium, Coniacium, Santonium, Campanium und Maastrichtium. Alle Stufen kommen in Nordrhein-Westfalen vor, jedoch sind keine vollständigen Profile der Oberkreide-Abfolge vorhanden. Die Ablagerungen der Oberkreide beschränken sich in Nordrhein-Westfalen auf das Münsterländer Kreidebecken und den Raum Aachen und sind größtenteils an der Geländeoberfläche oder unter geringmächtiger Überdeckung zu finden (Hiß & Schönfeld 2000).

Eine tabellarische Übersicht der Einheiten der Oberkreide mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der zuvor erstellten Inventarisierungstabelle Nordrhein-Westfalen (Kapitel 5) zu finden.

Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) wird für die Oberkreide in Nordrhein-Westfalen die Emscher-Formation betrachtet. Diese reicht vom Mittel-Coniacium bis Unter-Campanium.

Geographische Verbreitung

Die Emscher-Formation ist in Nordrhein-Westfalen im Münsterländer Kreidebecken zu finden.

Fazies/Ablagerungsraum

Zu Beginn der Oberkreide war das Münsterland vollständig vom Meer bedeckt. Es kam zur Bildung eines subsequenten Randtrogs mit mächtigen Sedimentablagerungen, der dem Niedersächsischen Tektogen südlich vorgelagert ist (Hiß & Schönfeld 2000). Das Münsterländer Kreidebecken ist faziell zweigeteilt in einen östlichen Teil, der von den monotonen Tonmergel- und Mergelsteinablagerungen der Emscher-Formation dominiert wird, und einen zentralen und südlichen Teil mit vielfältigeren und meist nicht flächenhaft erhaltenen Schichtenfolgen (Hiß et al. 2018).

Lithologie (Hiß 2018)

Im Nordost-Münsterland besteht die Emscher-Formation vorwiegend aus Tonmergelsteinen. Untergeordnet treten auch Kalkmergel- und Mergelkalksteine auf. Im Ruhrgebiet sind Schluffmergelsteine und gelegentlich Feinsandmergelsteine zu finden.

Mächtigkeit (Hiß 2018)

Die Emscher-Formation kann im Nordost-Münsterland (Raum Emsdetten – Ladbergen) Mächtigkeiten von mehr als 2000 m, im zentralen Münsterland (Raum Münster – Gütersloh) bis 1000 m und im südlichen Münsterland und östlichen Ruhrgebiet bis 500 m erreichen.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 218). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Vom Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW) wurden GIS-Dateien der Verbreitung von Tongesteinen der Emscher-Formation innerhalb des Teufenbereiches zwischen 300 m und 2.000 m geliefert (DokID_11842255/141/9367). Zudem erging der Hinweis darauf, dass diese vorgeschlagenen Gebiete auf dem „Geologischen 3D-Landesmodell“ basieren, das für weite Teile von Nordrhein-Westfalen als grobe Übersichts-darstellung vorliegt.

Die durch den GD NRW bereitgestellten Informationen zur Verbreitung von Tongesteinen in Nordrhein-Westfalen, die die Aufgaben des ewG übernehmen können, wurden hinsichtlich ihrer Nachvollziehbarkeit geprüft. Die Nachvollziehbarkeit der gelieferten Shape-Dateien wurde anhand von durch den GD NRW übermittelten Bohrungen sowie dem geologischen Landesmodell Nordrhein-Westfalen bewertet.

Hinsichtlich der dargestellten Verbreitung des Tongesteinshorizontes wurde durch die BGE darauf hingewiesen, dass der GD NRW das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ nach seiner Auffassung bereits angewendet hat, welches die ausgewiesenen Tongesteinsvorkommen begrenzt. Daher

kann die Verbreitung des ausgewiesenen Gebietes nicht nachvollzogen werden. Eine Prüfung hinsichtlich weiterer geeigneter Areale ist nicht möglich, da die übergebenen Bohrungen, mit Ausnahme einiger weniger Bohrungen im westlichen Landesteil keine Angaben zur Emscher-Formation enthalten.

Daher erfolgt die Ausweisung von Gebieten, die alle Mindestanforderungen erfüllen, nach dem Konzept der Anwendung der Mindestanforderungen der BGE (Kapitel 6 in BGE 2020j).

Tabelle 218: Auflistung aller verwendeten Daten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales-Gelände-Modell
3	NW	GD NRW	11883267/8849	ts	Landesmodell_NRW	3D-Landesmodell von Nordrhein-Westfalen
4	NW	GD NRW	11842255/141	pdf	2018_06_25_BGE_Datenlieferung_Mindestanforderungen_Antwortschreiben_Anlagen.doc	Anschreiben der Datenlieferung vom 25.06.2018
5	NW	GD NRW	11883267_02/8860	pdf	Schichtenverzeichnisse	Schichtenverzeichnisse von Bohrungen in Nordrhein-Westfalen
6	NI	LBEG	11881514/9108	pdf	016965000201_SV, 016904600131_SV	Schichtenverzeichnisse der Kohlenwasserstoff-Bohrdatenbank
7	DE	BGR	11844870_01/6849	pdf	prof_113	Profilschnitt des Geotektonischen Atlas 3D (Baldschuhn 2001)

Eigenrecherche

Es wurden keine weiteren Daten verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf der Emscher-Formation in Nordrhein-Westfalen geprüft wurde, ist in Tabelle 219 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 219: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Emscher aus der Basisfläche Emscher_Form_b	b_Emscher_NW.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Emscher_NW_MACRORESULT.ts
g) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	b_Emscher_NW_MACRORESULT_AK.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Emscher_NW_MACRORESULT_qs.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_Emscher_NW.dxf MG_t_Emscher_NW.txt
3. Bearbeitung der Basisfläche aus dem Modell mit ArcGIS Pro	GIS-Projekt: 02_Oberkreide_Nord.aprx
a) Umwandlung der DXF-Fläche in ein 2D-Shape und Teilen der Gesamtfläche in Einzelflächen	MG_t_Emscher_NW.shp
b) Entfernen aller Flächen, die kleiner als 10 km ² sind (Ausnahme Bundesland-Grenzen) und Abspeichern der verbleibenden Flächen als neue Shape-Datei	NW_NI_t_Emscher_final.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 219 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell von Nordrhein-Westfalen ist ein Übersichtsmodell dessen Grundlage häufig auf Ergebnissen aus unterschiedlichen Projekten beruht, deren Ergebnisflächen untereinander nicht konsistent abgestimmt wurden. Datenbasis und somit die Genauigkeit sind regional sehr unterschiedlich. Die Basisflächen Karbon Basis, Mitteldevon Basis, sowie die Einheiten „Emscher Formation“ und „Wealden Formation“ wurden nicht vollständig modelliert und sind lediglich angenäherte Darstellungen, um eine ungefähre Vorstellung von Tiefenlage und Mächtigkeit zu vermitteln.

Das Landesmodell weist eine Top- und elf Basisflächen für stratigraphische Einheiten sowie jeweils eine Top- und Basisfläche für Formationen auf:

11 Basishorizonte:

- gg_q_b (Quartär Basis)
- gg_t_b (Tertiär Basis)
- gg_kroha_b (Halterner Sande Basis)
- gg_kro_b (Oberkreide Basis)
- gg_kr_b (Kreide Basis)
- gg_j_b (Jura Basis)
- gg_tr_b (Trias Basis)
- gg_z_b (Zechstein Basis)

- gg_r_b (Rotliegend Basis)
- gg_c_b (Karbon Basis, unvollständig)
- gg_dm_b (Mitteldevon Basis, unvollständig)

1 Tophorizont:

- gg_praep_t (Präperm Top)

Formationen:

- Emscher_Form_t (Emscher Formation Top, unvollständig)
- Emscher_Form_b (Emscher Formation Basis, unvollständig)
- Wealden_t (Wealden Top, unvollständig)
- Wealden_b (Wealden Basis, unvollständig)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 219 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden (Kapitel 7.1.1). Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche Emscher wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche Emscher Formation Basis (Emscher_Form_b) verwendet (Tabelle 219, 2b).

Das digitale Geländemodell für Nordrhein-Westfalen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt (Tabelle 219, 2a). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben (Tabelle 219, 2d). Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 219, 2e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Emscher und der Topfläche berechnet (Tabelle 219, 2f). Die Topfläche setzt sich aus der Topfläche Emscher-Formation Top (Emscher_Form_t) sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen (Tabelle 219, 2c). Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht.

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen für die ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert wurde (vgl. BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem

Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde (Tabelle 219, 2g). Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ in m u GOK überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert (Tabelle 219, 2h). Bereiche der Bearbeitungsfläche, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, wurden gelöscht.

Die Bearbeitungsfläche Emscher wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 219, 2i).

2D-Bearbeitung

Die aus dem 3D-Modell resultierende Gesamtfläche wurde mit ArcGIS Pro weiterverarbeitet. Dabei wurde der gesamte Datensatz in einzelne Flächen getrennt, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung Flächenbedarf geprüft werden konnte (Tabelle 219, 3a). Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² (BT-Drs. 18/11398) wurden entfernt (Tabelle 219, 3b).

Allgemeine Literatur

Neben der erwähnten Literatur wurden die Arbeit von Hiß & Seibertz (2000) aus der „Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland“ (Hiß & Mutterlose 2000) und der „Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen“ (Grabert 1998a) für die Einschätzung der Lithologie und Verbreitung der Emscher-Formation verwendet.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse der Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen der Oberkreide bzw. Emscher-Formation geprüft. Einzelne, für die Bewertung relevante Bohrungen sind in Tabelle 221 aufgelistet.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithoty-

pen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen. Lithoty-
pen, denen Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkei-
ten auf, die die Anforderung an Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfül-
len. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgs-
durchlässigkeit von kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindest-
anforderungen teilweise. Hoth et al. (2007) weisen jedoch darauf hin, dass der Parame-
ter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Ton-
gesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgs-
durchlässigkeit genutzt werden kann.

Die Emscher-Formation enthält im Nordost-Münsterland hauptsächlich Tonmergelstein,
was unter anderem in der lithologischen Gliederung der „Emscher-Formation in tonig-
schluffiger Fazies Harsewinkel“ (GD NRW, DokID 11842255) deutlich wird. In den
Schichtenverzeichnissen der Bohrungen in Nordrhein-Westfalen, die jedoch nur für den
nördlichen Teil der ausgewiesenen Fläche vorhanden waren, finden sich Abfolgen von
Tonmergelstein und Tonstein. Insgesamt ist im Münsterland jedoch von Osten nach
Westen und zum Teil vom Liegenden zum Hangenden ein Übergang von reinem Ton-
mergelstein in siltigen und sandigen Tonmergelstein und letztlich in Grünsand festzu-
stellen (Hiß & Seibertz 2000). Im zentralen Münsterland treten auch vereinzelt Kalkstein-
bänke auf (Hiß & Seibertz 2000). Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass in
Teilen der ausgewiesenen Fläche des Münsterländer Kreidebeckens aufgrund der litho-
logischen Voraussetzungen die Anforderung an die erforderliche Gebirgsdurchlässigkeit
nicht erfüllt ist. In diesem Schritt des Verfahrens erfolgt jedoch keine detaillierte Beschrei-
bung der lithologischen Ausbildung. Erst im nächsten Schritt wird eine weitere litholo-
gisch/fazielle Eingrenzung vorgenommen.

In der ausgewiesenen Fläche in Niedersachsen waren keine Bohrungen mit Schichten-
verzeichnissen vorhanden, anhand derer das Vorkommen von Tongesteinen im nieder-
sächsischen Teil der Fläche überprüft werden konnte. Auf Grundlage der bisher in Be-
tracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgs-
durchlässigkeit für Tongestein in der Emscher-Formation der Oberkreide im Münsterland
in Nordrhein-Westfalen und im angrenzenden Gebiet in Niedersachsen **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit der Emscher-Formation wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit ei-
ner Mächtigkeit von weniger als 100 m wurden gelöscht. Die Mindestanforderung „Mäch-
tigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Emscher-Formation wurde anhand des 3D-Modells unter Einbezie-
hung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK
erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde
eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde. Die Mindestanforderung
„minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher als zunächst **er-
füllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort in Betracht zu ziehen, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Dies trifft auf das Münsterland in Nordrhein-Westfalen und den angrenzenden Bereich in Südwest-Niedersachsen zu.

Ergebnis

Eine Auflistung der Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, ist in Tabelle 220 zu finden. In Abbildung 100 ist das Ergebnis der Anwendung der Mindestanforderungen für die Emscher-Formation in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen dargestellt. Abbildung 101 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge eines Teils des ausgewiesenen Gebiets.

Tabelle 220: Auflistung aller Gebiete in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen, die die Mindestanforderungen erfüllen, mit Angabe der Flächengrößen

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Emscher_NW_1	5945
MG_t_Emscher_NW_2	31

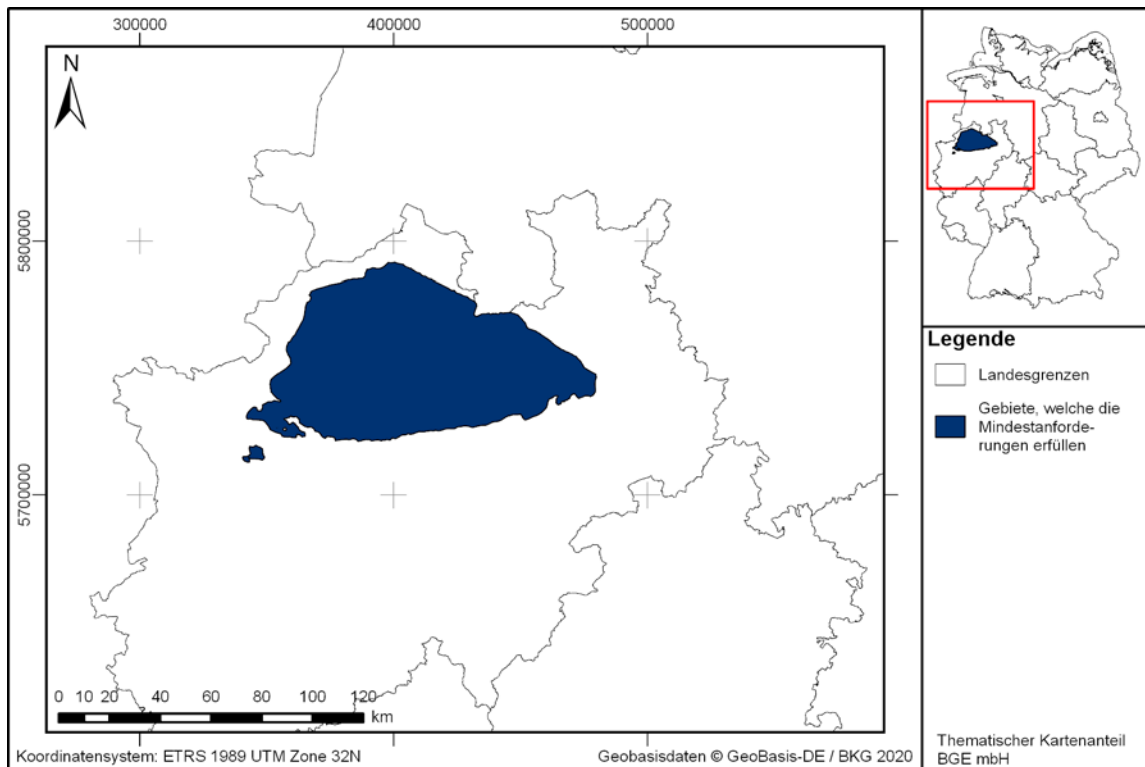


Abbildung 100: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Nordrhein-Westfalen und dem angrenzenden Gebiet in Niedersachsen.
 Die blaue Fläche zeigt das Gebiet im Münsterland, welches die Mindestanforderungen erfüllt.

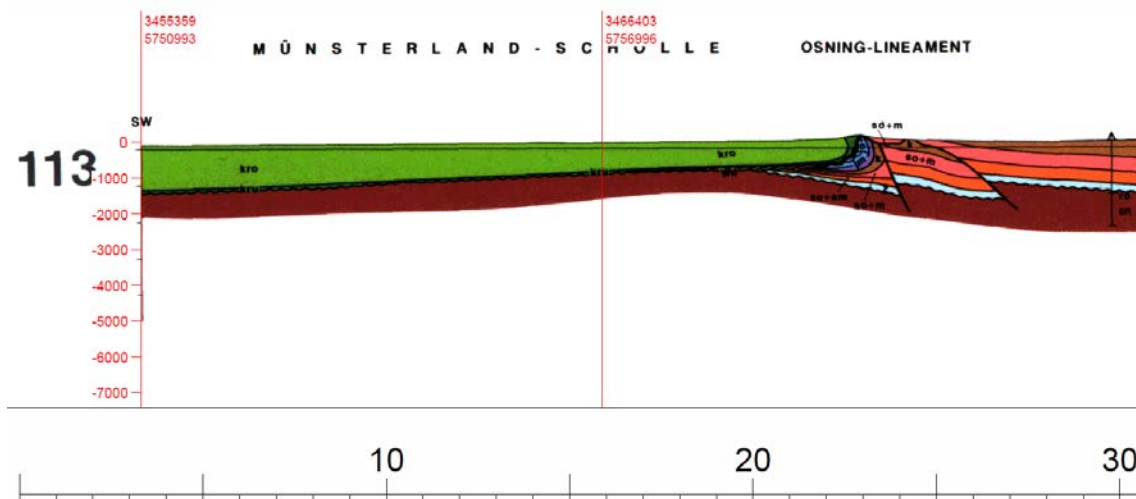


Abbildung 101: Profilschnitt Nr. 113 des Geotektonischen Atlas 3D (Baldschuhn 2001) durch einen Teil des nördlichen Münsterländer Kreidebeckens und dessen Begrenzung durch das Osning-Lineament

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 221 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Ge-

biete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 221: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei-gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11883267	8849		Landesmodell_NRW		3D-Landesmodell von Nordrhein-Westfalen
11842255	141	9367	2018_06_25_BGE_Datenlieferung_Mindestanforderungen_Antwortschreiben_Anlagen.doc	Tabellarische Übersicht der prognostischen lithologischen Gliederung des Teufenbereiches zwischen 300 m und 2000 m auf S. 7 („Emscher-Formation in tonig-schluffiger Fazies)	Anschreiben der Datenlieferung vom 25.06.2018
11883267_02	8860	2384532	Schichtenverzeichnisse.pdf	Ostbevern 1 (S. 273 – 274) B SAERBECK GREVEN (S. 251) Neuenkirchen 2 (S. 81) Neuenkirchen 1 (S. 80) Waldhügel 1 (S. 84) Burgsteinfurt 1 (S. 250) Vermold 1 (S. 289) Harsewinkel (S. 292) CONDETTA TIEFB.V (L1) (S. 275 – 276)	Schichtenverzeichnisse von Bohrungen
11881514	9108	2451589	016965000201_SV.pdf	Ostbevern 2	Bohrdaten der KW-Datenbank (NI)
11881514	9108	2451584	016904600131_SV.pdf	Bad Laer Z1	Bohrdaten der KW-Datenbank (NI)

1.3.33 Tertiär – Begründung der Nichtberücksichtigung von einigen tertiären Tonformationen Deutschlands

Kurzzusammenfassung

Die Anwendung der Mindestanforderungen beginnt in Phase I des Standortauswahlverfahrens mit der Inventarisierung der potenziell für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle geeigneten Wirtsgesteinsformationen in Deutschland. Für das Wirtsgestein Tongestein (vgl. § 23 Abs. 1 StandAG), welches nach der Begriffsbestimmung der BGE neben diagenetisch verfestigten Tonsteinen auch unverfestigte, plastische Tone umfasst (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j), wurden dabei über ganz Deutschland u. a. verschiedene, möglicherweise geeignete Tonformationen aus dem Tertiär identifiziert.

Insgesamt wurden in den verschiedenen Bundesländern 24 teilweise äquivalente Tonformationen des Tertiärs inventarisiert, die potenziell die in § 23 StandAG festgelegten Mindestanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erfüllen könnten. Dabei kommen im Allgemeinen Tonformationen im Norddeutschen Becken, im Bereich des Oberrheingrabens und im Alpenvorlandbecken in Frage (Krull et al. 2004; Hoth et al. 2007).

Die Auswertung von Fachliteratur und der der BGE von den Bundes- und Landesbehörden zur Verfügung gestellten Daten und Informationen ergab, dass von diesen nach jetzigem Stand lediglich die tonigen Abfolgen des Oberpaläozäns bis Untereozäns im Norddeutschen Beckens, die Landau-Formation im Bereich des Oberrheingrabens und die tonigen Abfolgen der Unteren Meeresmolasse im Alpenvorlandbecken die Mindestanforderungen erfüllen.

Demgegenüber bestehen für die Tonformationen des Obereozäns, Rupeliums und post-Rupeliums in Norddeutschland sowie einige in der Theorie in Frage kommende Tonformationen im Bereich des Oberrheingrabens bereits zum jetzigen Zeitpunkt begründete Zweifel, ob die vom StandAG vorgegebenen Mindestanforderungen gegenwärtig erfüllt sind bzw. über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren erfüllt werden können. Diese Formationen werden daher im Zuge der Anwendung der Mindestanforderungen nicht weiter berücksichtigt.

Das vorliegende Dokument stellt in kurzer Form die zentralen Aspekte dar, die zur Entscheidung zur Nichtberücksichtigung dieser tertiären Tonformationen geführt haben. Ausschlaggebende Gründe für eine Nichtberücksichtigung sind im Allgemeinen eine nicht hinreichende Mächtigkeit und flächenhafte Verbreitung, eine stark ausgeprägte lithologische Variabilität sowie Bedenken hinsichtlich des Erhalts der Barrierewirkung über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren.

Tertiäre Tone des Obereozäns in Norddeutschland

Im Bereich des heutigen Deutschlands kam es während des Tertiärs zur Ablagerung teilweise mächtiger Tonablagerungen (Hoth et al. 2007), die nach StandAG und der Begriffsbestimmung der BGE (BGE 2020j) als mögliche Wirtsgesteine für die Endlagerung

hochradioaktiver Abfälle in Betracht gezogen werden müssen. In diesem Zusammenhang wurde auf Basis der Inventarisierungsarbeiten die „Obereozän“-Tonformation im Norddeutschen Becken in Niedersachsen zunächst als potenziell geeignet eingestuft.

Die im Bartonium bis Priabonium im Obereozän entstandene Formation ist eine zeitlich begrenzt küstennah abgelagerte, analoge Fazies zur tiefer marinen Søvind-Mergel-Formation, die vom Mittel-Lutetium bis ins Priabonium reicht (King 2016). Die Søvind-Mergel-Formation besteht aus kalkigen Tonen bis Tonmergeln, die im Gebiet von Dänemark, Nord-Niedersachsen und Schleswig-Holstein abgelagert wurden und einen Kalkgehalt von bis zu 70% aufweisen (Heilmann-Clausen et al. 1984). Nach Süden und Südosten hin erfolgt ein gradueller Übergang zu den eher kalkfreien Ton-Silt-Wechsellagerungen der „Obereozän“-Tonformation (King 2016). Nach Schad (1947) ist das Obereozän in Nordwestdeutschland als Tonstein mit häufigem Auftreten von Kalksandsteinbänken ausgeprägt. Von Ostfriesland bis in den Raum Hamburg liegt eine Dreiteilung in eine untere und obere Serie von Tonen und Mergeln vor, dazwischen liegen tonige Sande und Kalksandstein, wobei die untere Tonserie im Raum Hamburg fehlt. Die Mächtigkeiten schwanken zwischen 150 m und 200 m, in halokinetischen Randsenken können bis zu 300 m erreicht werden.

Die Sichtung einer Auswahl über Niedersachsen verteilter Bohrungen ergab, dass das Obereozän in der Fläche nicht in ausreichender Mächtigkeit tonig ausgeprägt ist, um nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG als einschlusswirksamer Gebirgsbereich zu dienen. Die von Schad (1947) angegebenen Bohrungen oder Gebiete mit großer Obereozän-Mächtigkeit enthalten stark sandige Anteile oder sogar Sandsteinbänke, an anderer Stelle liegen anstelle reiner Tone Tonmergel vor. Vielerorts sind die obereozänen Ablagerungen zudem durch die prä-Rupelium-Erosionsfläche abgeschnitten.

Aufgrund des Kalkgehalts, der oft wechselnden Sandanteile, der häufigen Sandstein-Einschaltungen und der regional hohen Variabilität wird die „Obereozän“-Tonformation im Zuge der Anwendung der Mindestanforderungen nicht weiter berücksichtigt.

Inventarisierte, aber nicht weiter berücksichtigte Formationen:

- „Obereozän“-Tonformation, Eozän, Niedersachsen

Tertiäre Tone des Rupelium und post-Rupelium in Norddeutschland

Das Zeitalter des Tertiärs zeichnete sich u. a. durch alternierende Trans- und Regressionsphasen aus (Hallam 1984; Haq et al. 1988), in deren Folge es im Bereich des heutigen Deutschlands zur Ablagerung lithofaziell z. T. sehr unterschiedlicher Sedimente und mitunter mächtiger Tonabfolgen kam, so auch im Rupelium und geologisch jüngeren Zeitabschnitten des Tertiärs.

Die tonigen Ablagerungen des Rupelium („Rupelton“) stellen in Norddeutschland aufgrund ihrer geringdurchlässigen Eigenschaften die wichtigste geologische Barriere zwischen Salz- und Süßwasserstockwerk dar (Manhenke et al. 2001; Hoth et al. 2007). Im Falle eines Barriereversagens des Rupeltons als Teil eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs käme es somit nach gegenwärtigem Stand möglicherweise zu einem

schnellen und weitestgehend ungehinderten Transport von Radionukliden in nahe Süßwasseraquifere und damit die Biosphäre. Ein solches Szenario ist unbedingt auszuschließen.

Unterer Glimmerton, Oberer Glimmerton, Hamburg-Ton und Weißwasser-Subformation, welche alle auf Basis der Inventarisierung theoretisch ebenfalls als Wirtsgesteinsformationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Frage kommen, liegen in ihren Verbreitungsgebieten im Allgemeinen im Hangenden des Rupeltons und bilden untergeordnete Barrieren inmitten des Süßwasserstockwerks. Auch hier käme es bei einem eventuellen Verlust der Barriereintegrität über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren ggf. zu einem schnellen und umfangreichen Transport von Radionukliden in die Biosphäre, was zwingend ausgeschlossen werden muss.

Für Norddeutschland sind, wie auch für Teile Süddeutschlands (Reinhardt et al. 2017), erosive Auswirkungen vergangener Glazialzeiten nachgewiesen (Keller 2009; Weitkamp & Bebiolka 2017). Zukünftige, im Nachweiszeitraum von einer Million Jahren durchaus vorstellbare weitere Glazialzeiten (Keller 2009) könnten dementsprechend ebenfalls einen in Hinblick auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle negativen Einfluss auf den Untergrund Norddeutschlands haben, speziell in Form subglazialer Rinnen mit großen Erosionstiefen. Nach Keller (2009) ist deren Entstehung im Allgemeinen auf den Abfluss großer Mengen an Schmelzwasser unterhalb der Inlandseisbedeckung zurückzuführen, wobei prinzipiell Erosionstiefen von über 500 m möglich sind (Weitkamp & Bebiolka 2017). Insbesondere für eher unkonsolidierte, quartäre und tertiäre Sedimente ist innerhalb von einer Million Jahren somit ein erheblicher Mächtigkeitsverlust in Verbindung mit einem Verlust der Integrität der geologischen Barriere nicht auszuschließen (Keller 2009; Weitkamp & Bebiolka 2017). Jortzig (2010) und Bebiolka et al. (2011) weisen in diesem Zusammenhang beispielsweise darauf hin, dass der Rupelton in Brandenburg durch quartäre subglaziale Erosionsrinnen zum Teil vollständig erodiert bzw. in seiner Mächtigkeit erheblich reduziert wurde. Zukünftige Glazialzeiten haben also das Potenzial, einen eventuellen einschlusswirksamen Gebirgsbereich in Tonen des Rupeliums und post-Rupeliums in Norddeutschland signifikant zu gefährden.

Trotz prinzipiell guter Barriereeigenschaften bestehen für die Tonsedimente des Rupelium und post-Rupelium in Norddeutschland daher bereits in dieser verhältnismäßig frühen Phase des Standortauswahlverfahrens entsprechend § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG begründete Zweifel hinsichtlich der Integrität eines möglichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren. Ferner sind in Bezug auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gegenüber diagenetisch stärker verfestigten, prä-tertiären Tonsteinen sowohl für den Rupelton selbst als auch für sämtliche Tonabfolgen des post-Rupelium tendenziell ungünstigere geomechanische Eigenschaften und eine erhöhte Sensitivität gegenüber Temperaturerhöhungen anzunehmen (Hoth et al. 2007).

Im Zuge der Anwendung der Mindestanforderungen werden daher der Rupelton sowie alle weiteren hangenden und auf Basis der Inventarisierung theoretisch in Frage kommenden Tonablagerungen des post-Rupelium in Norddeutschland nicht weiter berücksichtigt. Nach jetzigem Stand kommen von den tertiären Tonen in Norddeutschland ausschließlich die Tonabfolgen des Oberpaläozän bis Untereozän als mögliches identifiziertes Gebiet in Betracht.

Inventarisierte, aber nicht weiter berücksichtigte Formationen:

- Rupelton, Oligozän, Brandenburg
- Rupelton, Oligozän, Mecklenburg-Vorpommern
- Rupelton, Oligozän, Niedersachsen
- Rupelton, Oligozän, Sachsen
- Rupelton, Oligozän, Sachsen-Anhalt
- Unterer Glimmerton, Miozän, Niedersachsen
- Unterer Glimmerton, Miozän, Schleswig-Holstein
- Oberer Glimmerton, Miozän, Niedersachsen
- Hamburg-Formation, Miozän, Niedersachsen
- Weißwasser-Subformation, Pliozän, Brandenburg

Tertiäre Tone im Bereich des Oberrheingrabens

Auch im Bereich des Oberrheingrabens kam es während des Tertiärs zur Ablagerung z. T. mächtiger Tonformationen (Hoth et al. 2007). Bei der Inventarisierung von potenziell für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle geeigneten Wirtsgesteinsformationen wurden über mehrere Bundesländer in dieser Region hinweg insgesamt vier Tonformationen des Tertiär als theoretisch geeignet eingestuft. Es handelt sich dabei um den Eozänen Basiston, die Tonablagerungen des Rupelium, die Landau-Formation und das Jungtertiär I.

Die Auswertung der vorliegenden Daten und Informationen zeigte, dass von diesen vier geeignet erscheinenden tertiären Tonformationen allein die miozäne Landau-Formation das Potenzial hat, die Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG zu erfüllen.

Während für den Eozänen Basiston und die Tonablagerungen des Rupelium großflächig eher zu geringe Mächtigkeiten unterhalb der in § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG festgelegten Mindestmächtigkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von 100 m zu erwarten sind (Boy et al. 2005), weist das Jungtertiär I eine stark ausgeprägte lithologische Variabilität auf, die im Gegensatz zur Definition des Wirtsgesteins Tongestein der BGE steht (BGE 2020j). Hinsichtlich des Eozänen Basistons ist darüber hinaus anzunehmen, dass dieser nur lokal in Talungen verbreitet ist (Boy et al. 2005).

Insgesamt ist für Tonformationen des Tertiär im Gebiet des Oberrheingrabens aufgrund der lokalen tektonischen Gegebenheiten von einem erhöhten Maß an tektonischer Beanspruchung und lithologischer Inhomogenität auszugehen (Krull et al. 2004). Krull et al. (2004) weisen in diesem Zusammenhang beispielsweise darauf hin, dass aufgrund des massiv durch Störungen beeinflussten Aufbaus des Untergrunds im Bereich des Oberrheingrabens z. T. bereits heute negative Beeinträchtigungen der Barriereintegrität potenzieller toniger Wirtsgesteinsformationen zu erwarten sind. Nach Hoth et al. (2007) müssen für Tonformation des Tertiär in Hinblick auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zudem tendenziell eher ungünstige Materialeigenschaften vorausgesetzt werden. Bei einem eher geringen Verfestigungsgrad tertiärer Tone ist dabei sowohl von ungünstigen geomechanischen Eigenschaften als auch einer erhöhten Sensitivität gegenüber signifikanten Temperatursteigerungen auszugehen (Hoth et al. 2007).

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte erfüllt von den inventarisierten tertiären Tonformationen im Bereich des Oberrheingrabens nach derzeitigem Stand nur die Landau-Formation die in § 23 StandAG festgelegten Mindestanforderungen. Da demgegenüber bereits zum jetzigen Zeitpunkt anzunehmen ist, dass der Eozäne Basiston, die Tonabfolgen des Rupelium und das Jungtertiär I trotz ihrer Barriereigenschaften absehbar nicht die Mindestanforderungen erfüllen, werden diese Formationen in der Konsequenz nicht weiter berücksichtigt.

Inventarisierte, aber nicht weiter berücksichtigte Formationen:

- Jungtertiär I, Miozän, Rheinland-Pfalz
- Rupelton, Oligozän, Rheinland-Pfalz
- Eozäner Basiston, Eozän, Rheinland-Pfalz

1.3.34 Tertiär, Unterpaläozän – Brandenburg, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Paläogen, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg mit Berlin und Sachsen-Anhalt, welches im Folgenden unter dem Übergriff Nordostdeutschland zusammengefasst wird.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Bayern, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie:

Tertiär, Paläogen, Paläozän (Thanetium) und Eozän (Ypresium)

Das Paläogen oder Alttertiär wird international in folgende Serien gegliedert: Paläozän, Eozän und Oligozän (Janssen et al. 2018; Deutsche Stratigraphische Kommission 2016). Alle Serien sind im Nordostdeutschen Becken unter Überdeckung von jüngeren Ablagerungen verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt die Stufen des Thanetium aus dem oberen Paläozän und des Ypresium aus dem unteren Eozän betrachtet.

Eine Zusammenstellung über die stratigraphischen Einheiten des Paläogen, Paläozän und Eozän und dessen lithologischer Ausprägung kann man der tabellarischen Übersicht der oben genannten nordostdeutschen Bundesländer (Kapitel 5).

Geographische Verbreitung

Das Thanetium liegt in Mecklenburg, aber nicht in Vorpommern vor, wobei die östliche Grenze in etwa der Ostgrenze der Landkreise Rostock und Ludwigslust-Parchim entspricht. Das Ypresium hingegen ist in Mecklenburg-Vorpommern nahezu flächendeckend vorhanden, streicht jedoch im östlichen Vorpommern aus und fehlt im nördlichen Rügen (Von Bülow & Müller 2004).

In Brandenburg liegt das Thanetium im Nord- und Westteil vor, von der Prignitz bis in die Uckermark, im Berliner Raum und mit weiteren Flächen im Kreis Potsdam/Mittelmark. Die Verbreitung des Ypresiums ist bei größerer Flächenabdeckung ähnlich, vor allem nach Osten reicht das Ypresium über die Verbreitung des Thanetium hinaus (Standke 2015).

Ablagerungen des Paläogen sind in Sachsen-Anhalt nicht flächendeckend vorhanden. Vielmehr gibt es im Norden Sachsens lokale Verzahnungen toniger und sandiger Fazies, die dem Verlauf der ehemaligen Küste folgen, besonders in der Helmstedter Bucht (Katzung 2004a; Standke 2008).

Fazies/Ablagerungsraum

Die tertiären Sedimente Nordostdeutschlands wurden im Nordseebecken abgelagert, das sich als Nachfolger des Deutschen Zechsteinbeckens entwickelte. Im Thanetium erfolgte die erste Transgression des Tertiär, mit der die Sedimentation im Nordseebecken von hauptsächlich kalkig zu hauptsächlich klastisch wechselte. Im Beckeninneren wurden Tonabfolgen abgelagert (Gürs et al. 2008). Durch die Regression im späten Thanetium wurden die thanetischen Sedimente in Nordostdeutschland teilweise erodiert und blieben vor allem in Salinarrandsenken erhalten (Von Bülow & Müller 2004; Stackebrandt 2010).

Das Eozän begann mit einer weiten über die Verbreitung des Paläozän hinausreichenden Transgression aus West, mit der das Nordseebecken im Ypresium seine größte Ausdehnung erreichte. Der basaltische Thule-Vulkanismus im Zuge der Öffnung des Nordatlantiks zwischen Island und den britischen Inseln (Gürs et al. 2008) führte zu einer Vielzahl von Aschelagen, die in Mecklenburg-Vorpommern in die Tone des beginnenden Eozän eingeschaltet sind (Von Bülow & Müller 2004; Gürs et al. 2008). Die Sedimentschüttung erfolgte hauptsächlich von Süden, Herkunftsgebiet war die Mitteldeutsche Schwelle (Stackebrandt 2010; Standke 2008). Die tonigen Ablagerungen des Ypresium liegen in Mecklenburg-Vorpommern hauptsächlich über Ablagerungen des Mesozoikum (Von Bülow & Müller 2004). Das tektonische Fernfeld der einsetzenden Alpenorogenese führte ab der Oberkreide zu erneut einsetzender Halokinese, sodass auf alten Salzkippen nun Salzdiapire aufstiegen (Maystrenko et al. 2006). Die Ablagerungen des Känozoikum wurden von Salztektonik modifiziert. Daraus resultieren geringe Mächtigkeiten über den Salzstrukturen und zum Teil stark erhöhte Mächtigkeiten in den Randsenken (Von Bülow & Müller 2004; Stackebrandt 2010).

Lithologie

Thanetium/Helle-Formation: In Mecklenburg-Vorpommern älteste bekannte tertiäre Abfolge. An der Basis liegt ein Transgressionshorizont aus grün berindeten Oberkreide-Feuersteinen. Die eigentlichen Helle-Schichten sind marine, dunkelgraue und grün-graue, pyritische-glaukonitische, kalkfreie bis kalkige Tone, Tonsteine und feinsandige Schluffe. Östlich der Linie Rostock-Laage-Parchim-Dönitz finden sich Sandschaler-Foraminiferen, westlich davon kalkschalige – was die küstennahe und küstenferne Fazies markiert (Von Bülow & Müller 2004). In Brandenburg ist die Helle-Formation als teils glaukonitische bzw. pyritische kalkige oder sandige Tone und Tonsteine beschrieben. Sie ist artenarm, prägnante sand- und kalkschalige Foraminiferen ordnen sie in tiefere marine Fazies ein. Auch hier ist das Basiskonglomerat von Feuersteingeröllen vorhanden (Standke 2015). In Sachsen-Anhalt ist die Helle-Formation im Norden vorhanden, aber als Silt ausgeprägt (Blumenstengel & Krutzsch 2008).

Ypresium/Schlieven-Formation: In Mecklenburg-Vorpommern als dunkle, grün-bis oliv-graue, kalkfreie schluffige Tone bis tonige Schluffe beschrieben. Nahe der Basis finden sich Tuffit-Lagen aus basaltischer Asche und maximal 10 cm dicke Faserkalk-Lagen. Lokal treten Toneisenstein- und Phosphoritkonkretionen auf (Von Bülow & Müller 2004). Die Schlieven-Formation in Brandenburg besteht aus kalkfreien Tönen und Schluffen (Standke 2015).

Ypresium/Marnitz-Formation: In Mecklenburg-Vorpommern als (weiterhin) pelagische, nicht optimal durchlüftete Stillwasserfazies beschrieben, bestehend aus tonigen Schluffen bis schluffigen Tönen, im oberen Abschnitt gibt es feinsandige Partien. Die Formation ist kalkfrei, grünlich-dunkelgrau und enthält Pyrit und Glaukonit. Die oberen Marnitzer Schichten enthalten „Scherbelsteine“, verkieselte Partien (Von Bülow & Müller 2004). In Brandenburg ist die Marnitz-Formation tonig-schluffig, durch einen weitverbreiteten Sandhorizont wird sie in „untere Marnitzer Schichten“ (Eozän-2 und -3 Foraminiferen-Faunen) und „obere Marnitzer Schichten“ (Eozän-4 Foraminiferen-Fauna) getrennt (Standke 2015).

Ypresium/Zerben-Formation: Die Zerben-Formation ist die randnahe sandige Vertretungsfazies der Schlieven- und Marnitz-Formationen, die mit ihr in Brandenburg und Sachsen-Anhalt nach Südosten verzahnt sind (Standke 2015; Blumenstengel & Krutzsch 2008).

Mächtigkeit

Die Helle-Formation besitzt in Südwest-Mecklenburg 70 m Mächtigkeit, die größte Mächtigkeit wurde in der Randsenke des Salzdiapirs Helle mit 250 m festgestellt. Südlich von Rostock liegen 40 m vor, nach Osten nimmt die Mächtigkeit ab (Von Bülow & Müller 2004). In Brandenburg hat die Helle-Fm. eine durchschnittliche Mächtigkeit von 10 m – 40 m (Standke 2015).

Die Schlieven- und Marnitz-Fm. liegen in Mecklenburg-Vorpommern bei Neubrandenburg gemeinsam mit 100 m Mächtigkeit vor, in Südwest-Mecklenburg werden 350 m erreicht. In Randsenken nahe der Elbe liegt die gemeinsame Mächtigkeit teilweise über 800 m. Im östlichen Vorpommern nimmt die Mächtigkeit ab und das Ypresium streicht aus (Von Bülow & Müller 2004). Schlieven- und Marnitz-Fm. erreichen in Brandenburg in der Diapirrandsenke der Struktur Storkow gemeinsam maximal 425 m Mächtigkeit (Standke 2015).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 222). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 222: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BGR	11844870_ 01/ 6846	pdf	BGR_Tonstudie2007	PDF-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
3	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Norddeutschland_West	Bohrdatenbank Tonstudie
3	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Norddeutschland_Ost	Bohrdatenbank Tonstudie
4	DE	BGR	11884574/ 8906	mdb	Bohrungen FIS_GEA_2	Bohrdatenbank Tonstudie
5	DE	BGE	11888776/ 9164	mdb	LUNG_SVZ_Kurz_2 020_02_06	Bohrdatenbank
6	DE	LBEG	11881514	mdb	KW_Datenbank	Bohrdatenbank (einzelne Bohrungen)
7	DE	BGE	11899989/ 9648	shp	Salzstrukturen_Inspee_v1_poly	Salzstrukturen

Eigenrecherche

Bohrdaten

Die in Tabelle 222 aufgeführten Bohrdatenbanken wurden auf Bohrungen untersucht, die die stratigraphischen Abfolgen des Ypresium und/oder Thanetium enthalten. Zusätzlich wurden ausgewählte Schichtverzeichnisse aus der Kohlenwasserstoff (KW)-Datenbank hinzugezogen. Diese wurden so ausgewählt, dass eine großflächige Abdeckung des Untersuchungsgebiets mit Bohrdaten gewährleistet werden konnte. Die KW-Datenbank enthält Bohrdaten der KW-Explorations- und -Produktionsbohrungen sowie Tiefbohrungen seit Beginn der Bohrtätigkeit und Versenkbohrungen.

Thematische Karten

Zusätzlich wurden folgende thematische Karten verwendet:

- Blumenstengel, H. & Krutzsch, W. (2008): Tertiär. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & m. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 267-292, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
 1. Abb. 4.12-4: Paläogeographie und Fazies des Paläozäns
 2. Abb. 4.12-5: Paläogeographie und Fazies des Ypresiums (Untereozän).
Bülow, W. & Müller, S. (2004): Regionalgeologische Stellung und Entwicklung. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 580, Stuttgart: Schweitzerbart. ISBN 9783510652105
 8. Abb. 3.9.1-2. Verbreitung des jüngeren Paläozäns – Heller Schichten
- Abb. 3.9.1-3. Verbreitung des Untereozäns- Schlievener und Marnitzer Schichten
- Standke, G. (2015): Tertiär. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. 259-333, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
 1. Verbreitung des jüngeren Paläozäns
 2. Verbreitung des Untereozän

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Paläozän und Untereozän in Brandenburg, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt geprüft wurde, ist in Tabelle 223 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 223: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Auswahl Bohrungen aus den Bohrdatenbanken (Tabelle 1 Nr. 1, 2, 3)	
a) Export der Tabellen mit den Orts und Schichtdaten nach Excel	
b) Zusammenführen der Tabellen über Daten → Microsoft Query	
c) Filtern der Bohrungen nach Untereozän und Paläozän und Überführung in ein neues Tabellenblatt	
d) Auswahl der Teufe Basis des Zielhorizonts	
e) Bestimmung der Teufe Top des Zielhorizonts	
2. Erstellen des Layers bohrungen.shp	
a) Einführung der Tabelle von Schritt 1 in ArcMap	
b) Bohrungen nach Koordinatensysteme splitten	
c) Bohrungen mit Koordinaten in entsprechendem Koordinatensystem anzeigen lassen	
d) Bohrungen in ETRS 1989 UTM Zone 32 N konvertieren	
e) Alle Bohrungen zusammenführen	
f) Neue Koordinaten hinzufügen	bohrungen.shp
3. Kalkulation der Mächtigkeiten	
a) Neue Spalte in AttributenTabelle hinzufügen	
b) Mächtigkeit als [BASIS - TOP] kalkulieren lassen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
4. Erstellen der Flächen für Teufe TOP des Zielhorizonts	
a) Interpolation mit Natural Neighbour anhand der Bohrungen mit Attributfeld TOP	top_interpol.grid
b) Reklassifizieren des Rasters wie folgt: <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 1400 \text{ m} \rightarrow 1$ • $> 1400 \text{ m} \rightarrow 2$ 	top_rekl.grid
c) Selektieren der Klasse 1 (kleiner als oder gleich 1400 m)	
d) Konvertierung des selektierten Rasters in Polygone	top_polyg.shp
5. Erstellen der Flächen für Teufe BASIS des Zielhorizonts	
a) Interpolation mit Natural Neighbour anhand der Bohrungen mit Attributfeld BASIS	basis_interp.grid
b) Reklassifizieren des Rasters wie folgt: <ul style="list-style-type: none"> • $< 400 \text{ m} \rightarrow 1$ • $\geq 400 \text{ m} \rightarrow 2$ 	basis_rekl.grid
c) Selektieren der Klasse 2 (größer als oder gleich 400 m)	
d) Konvertierung des selektierten Rasters in Polygone	basis_polyg.shp
6. Erstellen der Flächen für Mächtigkeit des Zielhorizonts	
a) Interpolation mit Natural Neighbour anhand der Bohrungen mit Attributfeld Mächtigkeit	maecht_interp.grid
b) Reklassifizieren des Rasters wie folgt: <ul style="list-style-type: none"> • Kleiner als 100 m $\rightarrow 1$ • größer als oder gleich 100 m $\rightarrow 2$ 	maecht_rekl.grid
c) Selektieren der Klasse 2 (größer als oder gleich 100 m)	
d) Konvertierung des selektierten Rasters in Polygone	maecht_polyg.shp
7. Zusammenstellen der Endflächen	
a) Verschneiden von Teufen TOP und BASIS Polygone (Schritte 4d und 5d)	top_basis.shp

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Verschneiden von Polygonen von Schritt 7a mit Mächtigkeitpolygone (Schritt 6d)	flaechen.shp
c) Flächen nach Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt Grenzen extrahieren	flaechen_ndo.shp
d) Salzstöcke von Salzstrukturen_Inspee_v1_poly.shp selektieren und als .shp exportieren	salzstoecke.shp
e) Salzstöcke aus den Flächen ausschneiden	flaechen_salzst.shp
f) Flächengröße in neuer Spalte in km ² kalkulieren lassen	
g) Flächen kleiner als 10 km ² auswerfen	flaechen_salzst.shp

2D-Bearbeitung

Bohrdaten

Die Bohrungsdaten wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Thanetium und Ypresium und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Grenzen der Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, von Niedersachsen geprüft. Da die Bohrdaten die Grundlage der Interpolierten Fläche darstellen, erfüllen alle 152 betrachteten Bohrungen die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in der auf Grundlage der 2D-Bearbeitung ausgewiesenen Fläche. Die Bohrdaten sind in im Anhang aufgelistet.

Interpolation

Für die ausgewählten Bohrungen wurden, basierend auf den zur Verfügung stehenden Schichtenverzeichnissen, Top, Basis und Mächtigkeit der entsprechenden stratigraphischen Einheiten ausgewählt und harmonisiert. In Tabelle 223 ist die Vorgehensweise beschrieben, welche als Ergebnis die interpolierten Flächen für diese Werte lieferte (4a, 5a, 6a).

Kartenmaterial

Zur Überprüfung von relevantem Tongestein des Ypresium und Thanetium in Nordostdeutschland wurden ausgewählte Verbreitungskarten georeferenziert und vektorisiert. Die verwendeten Karten sind in Kapitel 3 aufgelistet.

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage zur Verbreitung des Untereozän und Paläozän in Sachsen-Anhalt bildete die Arbeit von Blumenstengel & Krutzsch (2008) in der „Geologie von Sachsen-Anhalt“ (Bachmann et al. 2008), zur Verbreitung des Untereozän und Paläozän in Mecklenburg-Vorpommern die Arbeit von Von Bülow & Müller (2004) in der „Geologie von

Mecklenburg-Vorpommern“ (Katzung 2004a) und zur Verbreitung des Untereozän und Paläozän in Brandenburg die Arbeit von Standke (2015) in der „Geologie von Brandenburg“ (Stackebrandt & Franke 2015). Unterstützend fand die „Tonstudie der BGR“ (Hoth et al. 2007) Anwendung.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen. Lithotypen, denen Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die die Anforderung an Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Hoth et al. (2007) weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Die Formation des Ypresium und Thanetium im Gebiet Nordostdeutschland besteht überwiegend aus Tonstein und Tonmergel, dies zeigen die Bohrungen. Daher kann angenommen werden, dass die Abfolge von Tonsteinen der Helle-, Schlieven- und Marwitz-Formation die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit **erfüllt**.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die kumulative Mächtigkeit des Ypresium und Thanetium wurde für das untersuchte Gebiet durch Interpolation ermittelt. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht. Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Ypresium und Thanetium wurde anhand der interpolierten Flächen für Top und Basis des Schichtpakets Oberpaläozän und Untereozän geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m angesetzt, die erfüllt wurde. Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher als zunächst **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 102 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für das Schichtenpaket Thanetium/Ypresium (unteres Paläogen) in Nordostdeutschland dargestellt. Abbildung 103 zeigt einen repräsentativen Profilschnitt durch das Deckgebirge eines Teils des ausgewiesenen Gebiets.

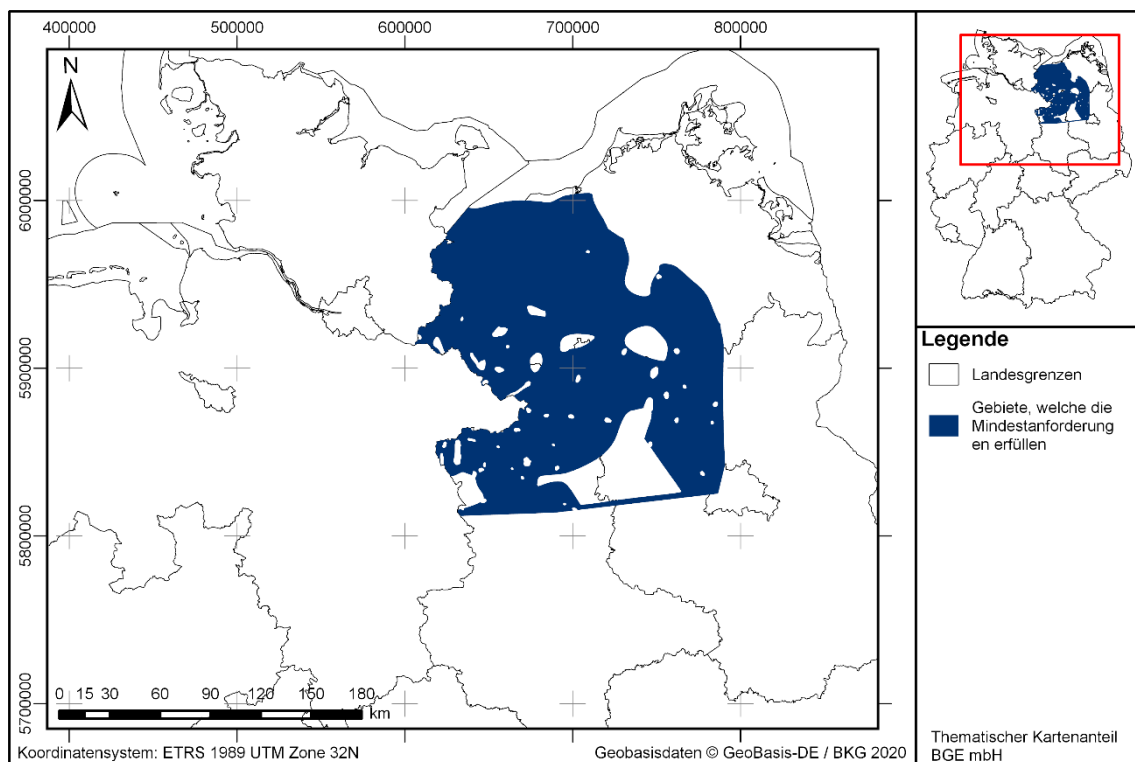


Abbildung 102: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Schichtenpaket Thanetium/Ypresium (unteres Paläogen)

Eine Auflistung dieser die Mindestanforderung erfüllenden Gebiete ist in Tabelle 224 zu finden.

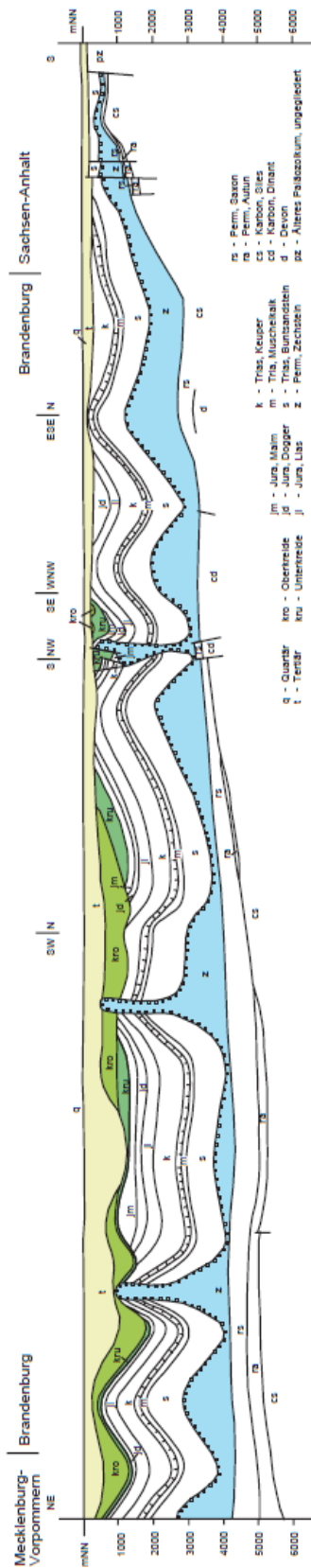


Abbildung 103: Profilschnitt durch Brandenburg, exemplarisch für die Lage des Tertiär im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens (verändert nach Stackebrandt 2010)

Tabelle 224: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km²]
MG_t_Tertiaer_NDO_1	22273

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 225 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 225: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11884574	8906	2385811	Gefilterte Bohrungen aus Norddeutschland_West.mdb	31.07.2020	Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang
11884574	8906	2385810	Gefilterte Bohrungen aus Norddeutschland_Ost.mdb	31.07.2020	Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang
11884574	8906	2385808	Gefilterte Bohrungen aus Bohrungen FIS GEA_2.mdb	31.07.2020	Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang
11888776	9164	2454084	Gefilterte Bohrungen aus LUNG_SVZ_Kurz_2020_02_06.mdb	31.07.2020	Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang
11881514	9109		Ausgewählte Bohrungen der KWDB	31.07.2020	Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang

1.3.35 Tertiär, Unterpaläozän – Niedersachsen

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Paläogen, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Niedersachsen, Bremen und Hamburg. Im Folgenden Text sind in der Bezeichnung Niedersachsen auch Bremen und Hamburg inbegriffen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Niedersachsen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Tertiär, Paläogen, Paläozän (Thanetium) und Eozän (Ypresium)

Das Paläogen oder Alttertiär wird international in folgende Serien gegliedert: Paläozän, Eozän und Oligozän (Janssen et al. 2018). Alle Serien sind in Niedersachsen unter Überdeckung von jüngeren Ablagerungen verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden in Niedersachsen die Stufen des Thanetium aus dem oberen Paläozän und des Ypresium aus dem unteren Eozän betrachtet.

Geographische Verbreitung

Die tonigen Folgen des Thanetium und Ypresium sind in Niedersachsen nicht flächendeckend vorhanden, sondern liegen nur im Nordwesten Niedersachsens vor (Ziegler 1990). Die südliche Verbreitungsgrenze des Paläozäns liegt etwa 100 km Inland, entlang einer Linie von Tenge/Oberlangen über Nienburg/Weser bis Ehra (Schad 1947). Diese Verbreitungsgrenze liegt etwas nördlich der paläozänen Küstenlinie. Die Verbreitungsgrenze des Ypresium (Nordhorn-Steinhuder Meer-Eddesse-Ehra) greift nach Süden und Osten über die Verbreitung des Paläozäns hinaus. Beide Stufen fehlen auf dem Top

einiger Salzstrukturen, vor allem fehlt das Thanetium auf den ostfriesischen Salzstöcken (Schad 1947).

Fazies/Ablagerungsraum:

Die tertiären Sedimente Niedersachsens wurden im Nordseebecken abgelagert, das sich als Nachfolger des Deutschen Zechsteinbeckens entwickelte. Nach einem Zurückweichen der Küstenlinie bis etwa Höhe Bremen im mittleren Paläozän erfolgte im Thanetium die erste Transgression des Tertiärs (Gürs 2006). Mit dieser wechselte die Sedimentation im Nordseebecken von hauptsächlich kalkig zu hauptsächlich klastisch, im Beckeninneren wurden Tonabfolgen abgelagert (Gürs et al. 2008). Nach einer Regression im oberen Thanetium, die jedoch die Ablagerungsbedingungen im heutigen Niedersachsen nicht veränderte, begann das Eozän wiederum mit einer weiten Transgression, mit der das Nordseebecken im Ypresium seine größte Ausdehnung erreichte. Der basaltische Thule-Vulkanismus im Zuge der Öffnung des Nordatlantiks zwischen Island und den britischen Inseln (King 2016) führte zu einer Vielzahl von Aschelagen, die in die Tone des beginnenden Eozäns eingeschaltet sind (Gürs et al. 2008). Die Sedimentschüttung erfolgte im Bereich Niedersachsens hauptsächlich von Süden, Herkunftsgebiet war die Mitteldeutsche Schwelle (Hinsch 1974). Das tektonische Fernfeld der einsetzenden Alpenorogenese führte ab der Oberkreide zu erneut einsetzender Halokinese des Zechsteinsalzes, sodass auf alten Salzkissen nun Salzdiapire aufstiegen (Maystrenko et al. 2006). Vor allem im Norden des Niedersächsischen Beckens sind die Sedimentmächtigkeiten des Tertiärs von den salztektonischen Prozessen abhängig, mit verringerten Mächtigkeiten über den Salzstrukturen und zum Teil stark erhöhten Mächtigkeiten in den Randsenken (Maystrenko et al. 2006; Scheck et al. 2003).

Lithologie

Thanetium/Basbeck-Formation, synonym Seelandium-Thanetium/Penningssehl-Formation

Abgelagert im Beckeninneren, aschgraue Tone mit Tonsteinlagen. Im tieferen Teil kalkschalige Foraminiferen. Die höhere Penningssehl-Formation reicht ins Thanetium. Transgressionshorizont im unteren Thanetium aus glaukonitbeschlagenen („grünberindeten“) Feuerstein-Geröllen (Gürs 2006).

Thanetium/Oberpaläozän-Formation

Folge von dunkel- bis schwarzgrauen Tönen und Tonsteinen. Vom Raum Hamburg bis zur Mittelweser-Region liegt das obere Thanetium als mittelgrauer, ziemlich fester, ungeschichteter Tonstein mit dunkelgrauen und graugrünen Flecken vor. Die Tonsteine sind in dieser Gegend praktisch sandfrei bis auf Einschaltungen von grobkörnigen Glaukonitlagen. Vom Raum Hamburg-Bremen südwärts nehmen die Glaukonit-Sand- und -Konglomerat-Einschaltungen zu, besonders stark sind sie nahe der heutigen Verbreitungsgrenze im höheren Paläozän. Bei Ehra liegt schon eine Wechsellagerung von marin-litoraler mit limnischer Fazies vor. Die Mikrofauna des höheren Paläozän ist durch Sandschaler-Foraminiferen gekennzeichnet, Megafossilien fehlen (Schad 1947).

Im Becken erfolgt ein lückenloser Übergang zu den Ablagerungen des Ypresium (Gürs 2006).

Die meisten älteren Beschreibungen des Ypresium in Nordwestdeutschland verwenden die traditionelle Gliederung in Untereozän 1-4, wobei Untereozän 2+3 oft zusammengefasst wurden. (Gürs 2006) setzt das Untereozän 1 und 2 mit der Lamstedt-Formation, das Untereozän 3 und tiefe Untereozän 4 mit der Fehmarn-Formation gleich. Nach Janssen et al. (2018) entsprechen die meisten lithostratigraphischen Einheiten des niedersächsischen Tertiärs allerdings nicht den stratigraphischen Standards, bisherige Definitionsversuche werden als unzureichend bewertet.

Ypresium/Untereozän 1 oder Lamstedt-Formation

Dunkel- bis schwarzgraue, gelegentliche grünliche Tone mit deutlicher Schichtung. Größtenteils sandfrei, teilweise Feinst- und Feinsand in allgemeiner Verteilung und in Lagen und Flasern, dort dann Glaukonit enthalten. Insgesamt bezeichnend für die Tone ist der hohe Glaukonitgehalt. An der Basis im Raum Hamburg und Ostfriesland liegt ein Transgressionskonglomerat vor. Das Untereozän 1 ist vor allem durch die Tufflagen des Thule-Vulkanismus gekennzeichnet (King 2016; Schad 1947). Im Verbreitungsbereich gibt es nur geringe fazielle Veränderungen, nach Süden und besonders Südosten nimmt im tieferen Untereozän 1 der Sandgehalt zu (Grafschaft Bentheim, Raum Ehra-Gifhorn). Mikrofauna von verkiesten Diatomeen, Sandschaler-Foraminiferen, keine Megafauna (Schad 1947).

Ypresium/Untereozän 2 oder Lamstedt-Formation

Vorwiegend fester, graugrüner, teilweise bläulicher Ton. Fast durchgehend sandflaserig, allgemein feinsandig. Sandige Partien enthalten in der Regel Glaukonit. Im oberen Untereozän 2 gelegentlich braungraue und braune Tone (Büsum, Neuhaus-Oste, Ostfriesland). Mikrofauna dominiert von Sandschaler-Foraminiferen, Megafauna fehlt (Schad 1947).

Ypresium/Untereozän 3 oder Fehmarn-Formation

Im Untereozän 3 liegen zwei Faziesbereiche vor. Im nördlichen Bereich (Ostfriesland, Raum Cuxhaven und bis Dänemark) vorwiegend sandfreie Tone bis Tonmergel, braungraue bis intensiv braunrote Farbe, anzusprechen als London-Ton-Fazies (Tarras in Schleswig-Holstein). Das Kerngebiet der London-Ton-Fazies liegt nördlich der Linie Emden, Varel, Stade, Fehmarn. Der Übergang zur graugrünen südlichen Fazies erfolgt bei Reitbrook (Hamburg), dort werden graubraune und olivbraune Farbtöne mit bräunlichen Bändern beobachtet. Es liegen Wechsel von sandigen und glaukonitischen Tonen und tonigen, glaukonitischen Sanden vor, dabei ist das Untereozän 3 sandiger als das Untereozän 2 und schwach kalkig (Schad 1947). Reich an kalkschaligen Foraminiferen (Gürs 2006).

Ypresium/Untereozän 4 oder höhere Fehmarn-Formation und Glinde-/Heilighafen-Fm.

Die Ablagerungen des Untereozän 4 sind nur im tiefsten der Formation tonig (Fazies wie Untereozän 2) und gehören damit noch zur höheren Fehmarn-Formation, darüber folgen Schluffe und Schluffsteine, im Osten die Glinde-Formation (Grünsand), nach Norden und Westen bleibt es tonig (analog dänische Lillebælt-Formation) (Gürs 2006). Im höheren Teil sind die Feinsandeinschaltungen kieselig verkittet und stellen ein splittriges Gestein dar, dieses liegt im gesamten Verbreitungsgebiet von den Niederlanden bis Schleswig-Holstein vor (Schad 1947). Das Untereozän 4 erfüllt lithologisch nicht die Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit, die Glinde-/Heilighafen-Formation ist nicht inventarisiert und wird im Folgenden nicht berücksichtigt.

Mächtigkeit

Das gesamte Paläozän in Niedersachsen hat allgemein eine Mächtigkeit von 40 m – 45 m. Im Hamburger Loch ist eine Mächtigkeit von 160 m beschrieben. Im südoldenburgischen Land liegen 10 m – 30 m vor (Schad 1947). Das Untereozän 1 hat im Raum Hamburg bis mittleres Oldenburg eine Mächtigkeit um 100 m, im südlichen Randgebiet noch 40 m – 60 m. Im Raum Cuxhaven und Ostfriesland liegen geringere Mächtigkeiten von 35 m – 40 m vor. Bei Gülze wurden 150 m erbohrt (Schad 1947). Die Ablagerungen des Untereozän 2+3 erreichen laut Literatur Mächtigkeiten von 70 m – 150 m (Ehlers 2011). Schad (1947) berichtet von Mächtigkeiten des Untereozän 2: 130 m bei Gülze erbohrt, bei Cuxhaven 10 m, im Oldenburger Land schwankend zwischen 23 m – 45 m, bei Georgsdorf 5 m – 10 m. Für das Untereozän beschreibt Schad (1947): ungefähr 200 m bei Gülze, 80 m – 100 m im Raum Oldenburg, ungefähr 150 m in Ostfriesland, Oldenburger Land nach Süden auf 44 m – 62 m abnehmend.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 226). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 226: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	NI	LBEG	11842295/ 7775	ts	BGE-GTA3D	3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen (Bombien et al. 2012)
2	HH	BUE	11880284/ 8434	ASCII/ts	Tiefenmodell Hamburg	3D-Modell von Hamburg mit 2 Basis- und 1 Topfläche
3	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales Geländemodell

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID Datei- gruppe	Daten for- mat	Dateiname	Beschreibung
4	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Bundesländergrenzen inkl. 12-Seemeilen-Zone
5	DE	BGR	11844870_ 01/6846	pdf	BGR_Tonstu- die2007	PDFf-Bericht Tonstudie (Hoth et al. 2007)
6	DE	BGR	2385810/8 906	mdb	Norddeutsch- land_West	Bohrdatenbank Tonstudie (Hoth et al. 2007)
7	DE	BGR	2385810/8 906	mdb	Norddeutsch- land_West	Bohrdatenbank Tonstudie
8	DE	LBEG	11881514/ 9105	2389925, 2389926	BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 1. Teil.accdb; BDNGeodinExport Niedersachsen tiefer 300m 2. Teil.accdb	Landes-Bohrdatenbank Nie- dersachsen (LBEG)
9	DE	LBEG	11881514	mdb	Bohr_prg (+ Daten)	Digitalisierte Daten der Koh- lenwasserstoff-Bohrungsda- tenbank
10	DE	BGR		pdf	InSpEE-Be- richt_2016	PDF-Bericht InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
11	DE	BGR	11842726/ 7632	shp	Strukturum- risse_500m	Digitale Höhenlinien Inpee (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
12	DE	BGR	11842726/ 7633	shp	Strukturum- risse_1000m	Digitale Höhenlinien Inpee (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)
13	DE	BGR	11842726/ 7634	shp	Strukturum- risse_1500m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID Datei- gruppe	Daten for- mat	Dateiname	Beschreibung
14	DE	BGR	11842726/ 7635	shp	Strukturum- risse_2000m	Digitale Höhenlinien InSpEE (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016)

Eigenrecherche

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bilden die Arbeiten „Das Tertiär Nordwestdeutschlands in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002“ (Gürs 2006) sowie „Neue stratigraphische Ergebnisse im nordwestdeutschen Tertiär“ (Schad 1947) zur Verbreitung des Untereozän und Paläozän Niedersachsen. Unterstützend finden die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007) und der InSpEE-Bericht (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016) Anwendung.

Bohrdaten

Die in Tabelle 226 aufgeführten Bohrdatenbanken (Nr. 6, 7 und 8) wurden auf Bohrungen gefiltert, die die stratigraphischen Abfolgen des Ypresium und/oder Thanetium enthalten. Zusätzlich wurden ausgewählte Schichtverzeichnisse aus der KW-Datenbank (Nr.9) hinzugezogen, um eine großflächige Abdeckung des Untersuchungsgebiets mit Bohrdaten zu gewährleisten. Die KW-Datenbank enthält Bohrdaten der KW-Explorations- und -Produktionsbohrungen sowie Tiefbohrungen seit Beginn der Bohrtätigkeit und Versenkbohrungen.

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden stichprobenhaft auf die Verbreitung der lithologischen Abfolgen des Ypresium und/oder Thanetium geprüft.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Oberpaläozän-Untereozän in Niedersachsen geprüft wurde, ist in Tabelle 227 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 227: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Oberpaläozän-Untereozän aus der Basisfläche Oberpaläozän-Untereozän (07_tpao-teou; aus allen Kacheln)	b_Oberpaläozän-Untereozän_NI.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Oberpaläozän-Untereozän_NI_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Oberpaläozän-Untereozän_NI_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_tpao-teou_NI.dxf MG_t_tpao-teou_NI.txt
3. Erstellen der Flächen in 2D	
a) Import der Fläche aus 2 i) als DXF in Arc-Map	
b) Konvertieren des DXF in Feature-Class in Geodatenbank	
c) Polygone exportieren	polygone.shp

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Polygone aggregieren	flaechen.shp
e) Flächen nach Niedersachsen, Hamburg und Bremen extrahieren	flaechen_nd.shp
f) Flächengröße in neuer Spalte in km ² kalkulieren lassen	
g) Flächen kleiner als 10km ² entfernen	
4. Erstellen des Layers punkte_selekt.shp von txt-Datei aus 2 i)	
a) Punkte mit Koordinaten anzeigen lassen	
b) Punkte auswählen, für die gilt: <ul style="list-style-type: none"> • Tiefenlage ≥ 400 m • Mächtigkeit ≥ 100 m 	
c) Selektierte Punkte exportieren	punkte_selekt.shp
5. Erstellen des Rasters für Teufe BASIS	
a) TIN erstellen anhand der Punkten mit Attributfeld Tiefenlage	basis_tin
b) TIN in Raster konvertieren	basis_raster.grid
c) Raster anhand der Flächen aus 3 g) ausschneiden	basis_tiefen.grid
6. Erstellen des Rasters für Mächtigkeit	
a) TIN erstellen anhand der Punkten mit Attributfeld Mächtigkeit	maecht_tin
b) TIN in Raster konvertieren	maecht_raster.grid
c) Raster anhand der Flächen aus 3 g) ausschneiden	maecht_fl.grid
7. Erstellen des Rasters für Teufe TOP	
a) Raster mathematisch als [BASIS-Mächtigkeit] (5c - 6c) ausrechnen lassen	top_tiefen.grid

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 227 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische Grundmodell ist der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D; Bombien et al. 2012) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Das GTA3D-Modell ist die digitale Umsetzung des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016) und bildet 15 stratigraphische Einheiten sowie die Geländeoberfläche ab:

- 01_dgm = digitales Geländemodell
- 02_q = Quartär ungegliedert
- 03_tmim-tpl = Mittelmiozän bis Pliozän
- 04_tmiu = Untermiozän
- 05_tolm-tolo = Rupel bis Oberoligozän
- 06_teom-tolu = Mitteleozän bis Unteroligozän
- 07_tpao-teou = Oberpaläozän bis Untereozän
- 08_kro = Oberkreide
- 09_kru = Marine Unterkreide
- 10_jo-Wd = Oberjura und Wealden
- 11_jutco-jmclo = Dogger
- 12_juhe-jutcu = Lias
- 13_k = Keuper
- 14_so-m = Röt und Muschelkalk
- 15_su-sm = Unterer und Mittlerer Buntsandstein
- 16_z = Zechstein

Die Elemente im GTA3D weisen neben der stratigraphischen Einheit auch eine Baueinheit auf. Die Basisflächen werden mit „basis“ beschrieben. Salzstrukturen setzen sich aus „top_dach“ und „wand“ zusammen. Störungen wurden in Segmenten senkrecht zwischen den einzelnen Basisflächen modelliert.

Der GTA3D deckt die gesamte Landesfläche der Hansestädte Bremen und Hamburg ab, sowie weite Teile von Niedersachsen bis auf den südlichen Bereich ab Höhe Göttingen. Die Flächen des GTA3D sind in 42 Kacheln untergliedert.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 227 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Die Basisflächen des GTA3Ds liegen kachelweise vor, daher wurde eine Bearbeitungsfläche aus den einzelnen Oberpaläozän-Untereozän-Basisflächen (07_tpao-teou) erzeugt. Allerdings sind an den Grenzen der Kacheln teilweise Versätze und *borders* (Grenzlinien in der Vermaschung) offenkundig.

Das digitale Geländemodell für Niedersachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 227, 2a – e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Oberpaläozän-Untereozän und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Mitteleozän bis Unteroligozän, Rupel bis Oberoligozän, Untermiozän, Mittelmiozän bis Pliozän, des Quartär sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 227, 2f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 227, 2h).

Die Bearbeitungsfläche Oberpaläozän-Untereozän wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 227, 2i).

2D-Bearbeitung

Die in Tabelle 227 beschriebene 2D-Bearbeitung erfolgte in dem GIS-Programm ArcMap 10.2 von ESRI. Datengrundlage waren die aus der Bearbeitung des 3D-Modells übergebenen Daten, welche aus dem Schritt 2i in Tabelle 227 stammen.

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 227 unter den Punkten 3 bis 7 beschrieben.

Als Ergebnis der 2D-Bearbeitung wurde ein Polygon-Shapefile aus den Daten des Ländermodells erzeugt (3 g), die in Kapitel 5 dargestellt sind, sowie die ergänzenden Raster mit Tiefenlage und Mächtigkeit (Tabelle 227, 5c, 6c, 7a).

Abgleich mit Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Thanetiums und Ypresiums geprüft.

Die in der Tonstudie von (Hoth et al. 2007) veröffentlichten Bohrungsdaten und Bohrdaten der KW Datenbank wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Thanetiums und Ypresiums und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m innerhalb der Grenzen der Gebiete, welche aus dem 3D-Modell extrahiert wurden, von Niedersachsen geprüft. Von den 95 betrachteten Bohrungen erfüllen dabei 91 die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in der auf Grundlage der 2D-Bearbeitung ausgewiesenen Fläche. Die Bohrdaten sind im Anhang aufgelistet.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen. Lithotypen, denen Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die die Anforderung an Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Hoth et al. (2007) weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Die Formation des Thanetiums und Ypresiums im Gebiet Niedersachsen besteht überwiegend aus Tonstein, dies zeigen die Bohrungen aus Anhang 1. Daher kann angenommen werden, dass die Abfolge von Tonen der Basbeck-, Lamstedt- und Fehmarn-Formation die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit **erfüllt**.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Oberpaläozän-Untereozän wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Ypresium und Thanetium zusammen. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Oberpaläozän-Untereozän (07_tpao-teou) wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche un-

terhalb von 300 m u. GOK (und oberhalb von 1500 m u. GOK) erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 104 wird das Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Einheiten des Thantium und Ypresium in Niedersachsen dargestellt. Abbildung 105 zeigt ein geologisches Profil durch einen Teil Niedersachsens, das die Lagerung des Paläogens in Niedersachsen repräsentativ widerspiegelt.

Eine Auflistung dieser auch als „Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen“ bezeichneten Ergebnisflächen ist in Tabelle 228 zu finden.

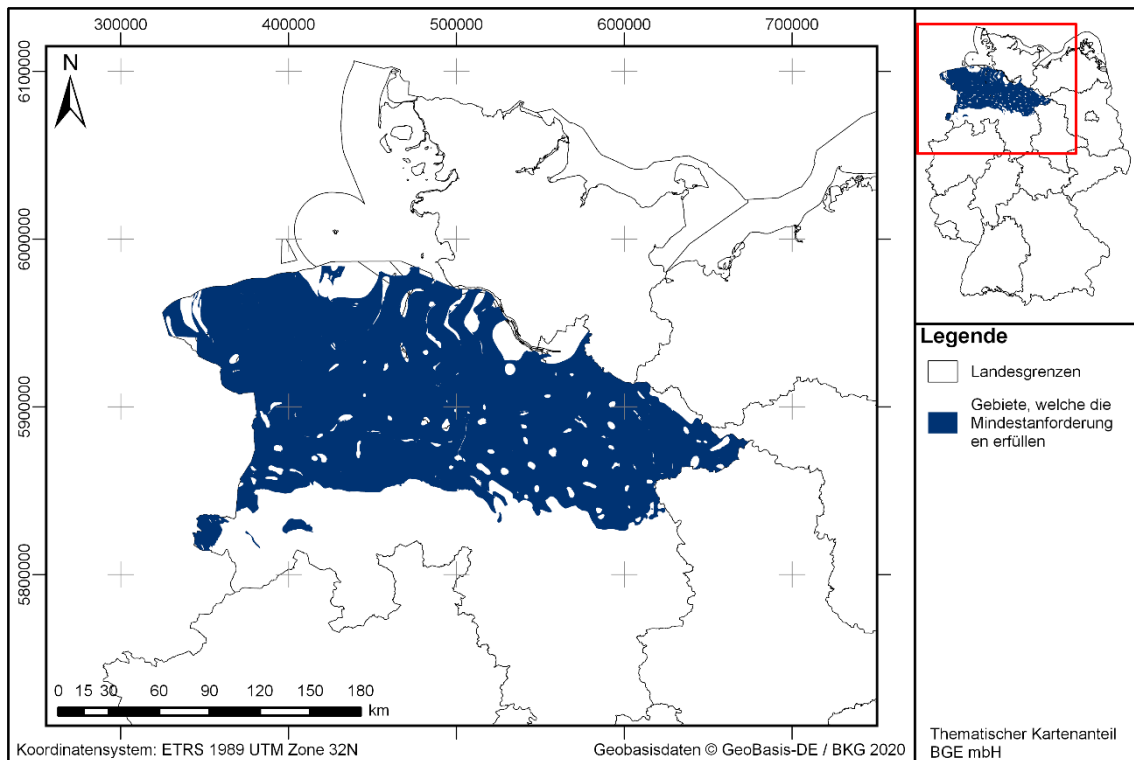


Abbildung 104 Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Schichtenpaket Thanetium/Ypresium (unteres Paläogen)

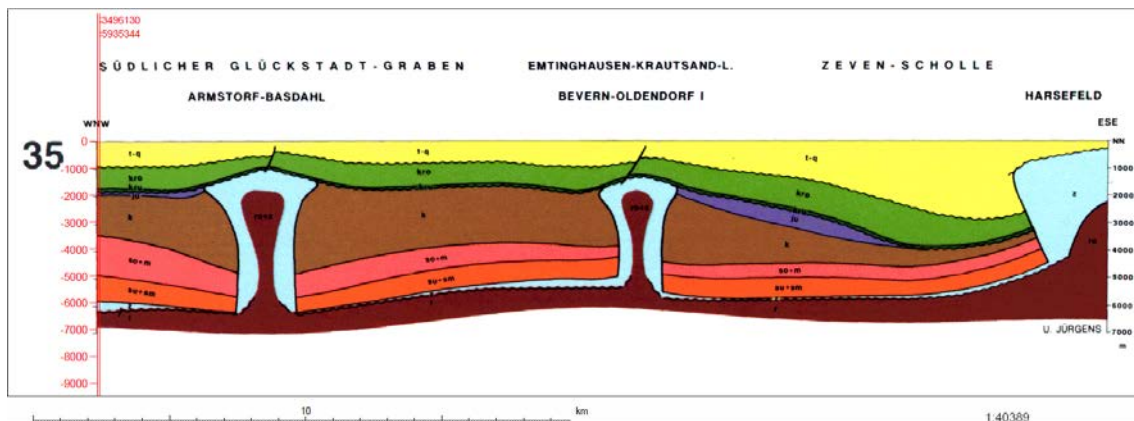


Abbildung 105: Profilschnitt von Kleinhain bis Harsefeld im Elbe-Weser-Dreieck (Baldschuhn et al. 2001; Müller et al. 2016). Tertiär und Quartär sind zusammengefasst (gelb), exemplarisch werden die typischen Lagerungsverhältnisse des norddeutschen Paläogen gezeigt: Störungen im Wesentlichen im Kontext von Salinarstrukturen, erhöhte Mächtigkeiten in Salinarrandsenken, verringerte Mächtigkeiten auf Salinarstrukturen.

Tabelle 228: Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen, Fläche)

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Tertiaer_NI_1	277

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Tertiaer_NI_2	29879
MG_t_Tertiaer_NI_3	99
MG_t_Tertiaer_NI_4	85
MG_t_Tertiaer_NI_5	12
MG_t_Tertiaer_NI_6	11

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 229 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 229: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11842295	7775		BGE-GTA3D		3D-Modell für Niedersachsen, Hamburg und Bremen
2385810	8906		Bohrungen aus der Bohrdatenbank West der Tonstudie		Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang
2385810	8906		Bohrungen aus der Bohrdatenbank Ost der Tonstudie		Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang
11881514	9109	-	Bohrungen aus der Bohrdatenbank der KW-DB	31.07.2020	Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang

1.3.36 Tertiär, Unterpaläozän – Schleswig-Holstein

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Paläogen, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Schleswig-Holstein.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Schleswig-Holstein, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Tertiär, Paläogen, Paläozän (Thanetium) und Eozän (Ypresium)

Das Paläogen oder Alttertiär wird international in folgende Serien gegliedert: Paläozän, Eozän und Oligozän (Janssen et al. 2018). Alle Serien sind in Schleswig-Holstein unter Überdeckung von jüngeren Ablagerungen verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden in Schleswig-Holstein die Stufen des Thanetium aus dem oberen Paläozän und des Ypresium aus dem unteren Eozän betrachtet.

Eine Zusammenstellung über die stratigraphischen Einheiten des Paläogen und dessen lithologischer Ausprägung kann man der tabellarischen Übersicht von Schleswig-Holstein (Kapitel 5) entnehmen.

Geographische Verbreitung

Das Thanetium und Ypresium sind in Schleswig-Holstein nahezu flächendeckend vorhanden. Lediglich auf dem Top einiger Salzstrukturen fehlen sie (Hinsch 1974).

Fazies/Ablagerungsraum

Die tertiären Sedimente Schleswig-Holsteins wurden im Nordseebecken abgelagert, das sich als Nachfolger des Deutschen Zechsteinbeckens entwickelte. Im Thanetium erfolgte

die erste Transgression des Tertiärs, mit der die Sedimentation im Nordseebecken von hauptsächlich kalkig zu hauptsächlich klastisch wechselte. Im Beckeninneren wurden Tonabfolgen abgelagert (Gürs et al. 2008). Nach einer Regression im oberen Thanetium, die jedoch die Ablagerungsbedingungen im heutigen Schleswig-Holstein nicht veränderte, begann das Eozän wiederum mit einer weiten Transgression, mit der das Nordseebecken im Ypresium seine größte Ausdehnung erreichte. Der Thule-Vulkanismus im Zuge der Öffnung des Nordatlantiks zwischen Island und den britischen Inseln (King 2016) führte zu einer Vielzahl von Aschelagen, die in die Tone des beginnenden Eozäns eingeschaltet sind (Gürs et al. 2008). Die Sedimentschüttung erfolgte im Bereich Schleswig-Holsteins hauptsächlich von Süden, Herkunftsgebiet war die Mitteldeutsche Schwelle (Hinsch 1974). Das tektonische Fernfeld der einsetzenden Alpenorogenese führte ab der Oberkreide zu erneut einsetzender Halokinese, sodass auf alten Salzklissen nun Salzdiapire aufstiegen (Maystrenko et al. 2006). Im gesamten Glückstadt-Graben – und damit im Großteil von Schleswig-Holstein – sind die Sedimentmächtigkeiten von den salztektonischen Prozessen abhängig, mit verringerten Mächtigkeiten über den Salzstrukturen und zum Teil stark erhöhten Mächtigkeiten in den Randsenken (Maystrenko et al. 2006).

Lithologie

Die Basbeck-Formation des Thanetium, in älteren Texten als Teil der Landen-Formation beschrieben, heute synonym zu Seelandium-Thanetium/Penningsehl-Formation (Gürs 2006), ist eine Folge von grauen Tonen mit Sandflasern. An der Basis können grüne Feuersteingerölle auftreten (Hinsch 1974).

Die meisten Beschreibungen des Ypresium in Schleswig-Holstein verwenden die traditionelle Gliederung in Untereozän 1–3, wobei Untereozän 2+3 oft zusammengefasst werden. Heute werden Untereozän 1 und 2 gemeinsam in die Lamstedt-Formation gestellt, während Untereozän 3 und unteres Untereozän 4 die Fehmarn-Formation bilden (Gürs 2006).

Thanetium/Untereozän 1+2 oder Lamstedt-Formation: Graue bis grüngraue Tone, größtenteils sandfrei, gekennzeichnet vor allem durch die Tufflagen des Thule-Vulkanismus (King 2016; Schad 1947). Da ungefähr analog zum dänischen „Mo-Ton“ (Fur-Formation) auch als „Mo-Formation“ bezeichnet. Die Mo-Fm. ist durch das Auftreten der Aschelagen definiert, die Untereozän-1-Fm. biostratigraphisch über das Auftreten großer, pyritisierter Diatomeen, sie stimmen dadurch nicht exakt überein (King 2016). Das Untereozän 2 ist eine räumlich begrenzte Sonder- bzw. Randfazies. Sie tritt als Feinsand oder feinsandige Einschaltungen im Raum Hamburg und südöstlichen Schleswig-Holstein auf und führt wenige Fossilien von agglutinierenden Sandschaler-Foraminiferen (Hinsch 1974), in weiten Teilen Schleswig-Holsteins fehlt sie (Schad 1947).

Ypresium/Untereozän 3 oder Fehmarn-Formation: Graue bis grüne, glaukonithaltige Tone, mit Zwischenschaltungen von rötlichen Tonen (Ehlers 2011; Hinsch 1974). Generell fossilarm. Im höheren Untereozän 3 im Übergang zum Untereozän 4 tritt ebenfalls im Raum Hamburg und südöstlichen Schleswig-Holstein der alpha/beta-Sand als

Feinsandlage auf (Hinsch 1974). In der älteren Literatur werden die Tone des Untereozän 3 als London-Ton-Fazies, bzw. auf Fehmarn (dort anstehend, z. B. Steding et al. 2018), als Tarras-Ton angesprochen (Gürs et al. 2008; Schad 1947), wobei diese Bezeichnungen noch nicht völlig außer Gebrauch sind.

Mächtigkeit

Das gesamte Paläozän in Schleswig-Holstein erreicht in seiner Mächtigkeit selten 40 m (Schad 1947). Das Untereozän 1 hat eine Mächtigkeit bis etwa 50 m. Die Ablagerungen des Untereozän 2+3 erreichen laut Literatur Mächtigkeiten von 70 m – 150 m (Ehlers 2011). Bei der stichprobenhaften Bohrsichtung wurden Mächtigkeiten bis zu 270 m festgestellt.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 230). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 230: Auflistung verwendeter Eingangsdaten.

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales-Gelände-Modell
3	SH	LLUR	11839735/ 6220		3D-Basismodell	3D-Modell
4	DE	BGR	11884574 /8906	mdb	Norddeutschland West Tonstudie	Bohrdatenbank
5	DE	LBEG	11881514	mdb	KWDB	einzelne Bohrungen

Eigenrecherche

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage zur Verbreitung des Untereozäns und Paläozäns in Schleswig-Holstein bilden die Arbeiten „Das Tertiär im Untergrund von Schleswig-Holstein“ (Hinsch 1974) und „Neue stratigraphische Ergebnisse im nordwestdeutschen Tertiär“ (Schad 1947). Unterstützend findet die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007) Anwendung.

Bohrdaten

Die in Tabelle 230 aufgeführte Bohrdatenbank (Nr. 4) wurden auf Bohrungen gefiltert, welche stratigraphischen Abfolgen des Ypresium und/oder Thanetium enthalten. Zusätzlich wurden ausgewählte Schichtverzeichnisse aus der KW-Datenbank hinzugezogen (Nr. 5), um eine großflächige Abdeckung des Untersuchungsgebiets mit Bohrdaten zu gewährleisten.

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden stichprobenhaft auf die Verbreitung der lithologischen Abfolgen des Ypresium und/oder Thanetium geprüft.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Paläogen in Schleswig-Holstein geprüft wurde, ist in Tabelle 231 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 231: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	SH_DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; SH_DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Tertiär aus der Basisfläche Oberes Paläozän	b_Tertiaer_SH.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_Tertiaer_SH_MACRORESULT.ts
g) Falls 3D-gepufferte Störungen vorkommen, diese mit der Bearbeitungsfläche schneiden und Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete löschen	
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Tertiaer_SH_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_t_SH.dxf MG_t_t_SH.txt
3. Erstellen der Flächen in 2D	
a) Import der Fläche aus 2i als DXF in ArcMap	
b) Konvertieren des DXF in Feature-Class in Geodatenbank	
c) Polygone exportieren	polygone.shp
d) Polygone aggregieren	flaechen.shp
e) Flächen nach Schleswig-Holstein extrahieren	flaechen_nd.shp
4. Erstellen des Layers punkte_selekt.shp von txt-Datei aus 2i	
a) Punkte mit Koordinaten anzeigen lassen	
b) Punkte auswählen, für die gilt: <ul style="list-style-type: none"> • Tiefenlage ≥ 400 m • Mächtigkeit ≥ 100 m 	
c) Selektierte Punkte exportieren	punkte_selekt.shp
5. Erstellen des Rasters für Teufe BASIS	
a) TIN erstellen anhand der Punkten mit Attributfeld Tiefenlage	basis_tin
b) TIN in Raster konvertieren	basis_raster.grid
c) Raster anhand der Flächen aus 3e ausschneiden	basis_tiefen.grid
6. Erstellen des Rasters für Mächtigkeit	
a) TIN erstellen anhand der Punkten mit Attributfeld Mächtigkeit	maecht_tin

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) TIN in Raster konvertieren	maecht_raster.grid
c) Raster anhand der Flächen aus 3e ausschneiden	maecht_fl.grid
7. Erstellen des Rasters für Teufe TOP	
a) Raster mathematisch als [BASIS-Mächtigkeit] (5c - 6c) ausrechnen lassen	top_tiefen.grid

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 231 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das Basismodell SH ist ein geologisches 3D-Modell des Geologischen Dienstes Schleswig-Holstein (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, LLUR) aus dem Jahr 2012 (Hese et al. 2012). Zur Bearbeitung des Modells wurden Daten des Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland verwendet (Baldschuhn et al. 2001). Störungsflächen wurden nicht als durchgehende Flächen ausgehalten, sondern lediglich als vertikale Versätze dargestellt. Das modellierte Gebiet umfasst das komplette Bundesland Schleswig-Holstein inklusive der 12-Seemeilen-Zone. Folgende Flächen wurden hauptsächlich als Basisflächen modelliert:

- GTA3D_00_Topographie: Geländeoberfläche
- GTA3D_01_Basis_TmiR: Mittleres Miozän
- GTA3D_02_Basis_TmiU: Miozän
- GTA3D_03_Basis_ToIM: Mittleres Oligozän
- GTA3D_04_Basis_TeoM: Mittleres Eozän
- GTA3D_05_Basis_TpaO: Oberes Paläozän
- GTA3D_06_Basis_KrO: Obere Kreide
- GTA3D_07_Basis_KrU: Untere Kreide
- GTA3D_08_Basis_JO: Oberer Jura
- GTA3D_09_Basis_JM: Mittlerer Jura
- GTA3D_10_Basis_JU: Unterer Jura
- GTA3D_11_Basis_K: Keuper
- GTA3D_12_Basis_SO: Oberer Buntsandstein
- GTA3D_13_Basis_SU: Unterer Buntsandstein

- GTA3D_14_Basis_Z: Zechstein
- GTA3D_Salzdiapire: Hüllflächen der Salzstrukturen

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 231 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Erstellung der Bearbeitungsfläche Paläogen wurde die Basisfläche Oberes Paläozän aus dem 3D-Modell verwendet.

Das digitale Geländemodell für Schleswig-Holstein wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht (Tabelle 231, 2a – e).

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche Tertiär und der Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus den Basisflächen des Mittleren Eozän, Mittleren Oligozän, Unteren Miozän, Mittleren Miozän sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM_-300m) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht (Tabelle 231, 2f).

Falls in dem Bearbeitungsgebiet 3D-gepufferte Störungen vorhanden sind, wird aus dem Verschnitt mit der Bearbeitungsfläche eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wird. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wird berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche werden gelöscht (Tabelle 231, 2g).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 – 1500 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 231, 2h).

Die Bearbeitungsfläche Tertiär wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben (Tabelle 231, 2i).

2D-Bearbeitung

Die in Tabelle 231 beschriebene 2D-Bearbeitung erfolgte in dem GIS-Programm ArcMap 10.2 von ESRI. Datengrundlage waren die aus der Bearbeitung des 3D-Modells übergebenen Daten, welche aus dem Schritt Nr. 2i in Tabelle 231 stammen.

Die Arbeitsschritte und resultierenden Flächen sind in Tabelle 231 unter den Punkten 3 bis 7 beschrieben.

Als Ergebnis der 2D-Bearbeitung wurde ein Polygon-Shapefile aus den Daten des Ländermodells erzeugt (Nr. 3e), die in Kapitel 5 dargestellt sind, sowie die ergänzenden Raster mit Tiefenlage und Mächtigkeit (Tabelle 231, 5c, 6c, 7a).

Abgleich mit Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen des Thanetiums und Ypresiums geprüft.

Die in der Tonstudie von Hoth et al. (2007) veröffentlichten Bohrungsdaten und Bohrdaten der KW Datenbank wurden auf die kumulative Mächtigkeit der auftretenden Tongesteinsformation des Thanetiums und Ypresiums und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK innerhalb des Grenzen der Gebiete, welche aus dem 3D-Modell extrahiert wurden, von Schleswig-Holstein geprüft. Von den 30 betrachteten Bohrungen erfüllen dabei alle die vorgenannten Mindestanforderungen und befinden sich in der -auf Grundlage der 2D-Bearbeitung ausgewiesenen- Fläche. Die Bohrdaten sind im Anhang aufgelistet.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen. Lithotypen, denen Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die die Anforderung an Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Hoth et al. (2007) weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Die Formation des Thanetium und Ypresium im Gebiet Schleswig-Holstein besteht überwiegend aus Tonstein, dies zeigen die Bohrungen. Daher kann angenommen werden, dass die Abfolge von Tonsteinen der Basbeck-, Lamstedt- und Fehmarn-Formation die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit **erfüllt**.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit des Oberpaläozän – Untereozän wurde im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht. Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fasst die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheit des Oberpaläozän und des Untereozän zusammen. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage des Oberpaläozän-Untereozän wurde im südlichen Teil anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m u. GOK angesetzt, die erfüllt wurde. Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als zunächst **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Für das verbleibende Gebiet wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. In Abbildung 106 ist das Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Einheit Paläogen in Schleswig-Holstein dargestellt. Abbildung 107 zeigt ein geologisches Profil durch einen Teil Schleswig-Holsteins, das die Lagerung des Paläogens in Schleswig-Holstein repräsentativ widerspiegelt.

Eine Auflistung dieser auch als „Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen“ bezeichneten Ergebnisflächen ist in Tabelle 232 zu finden.

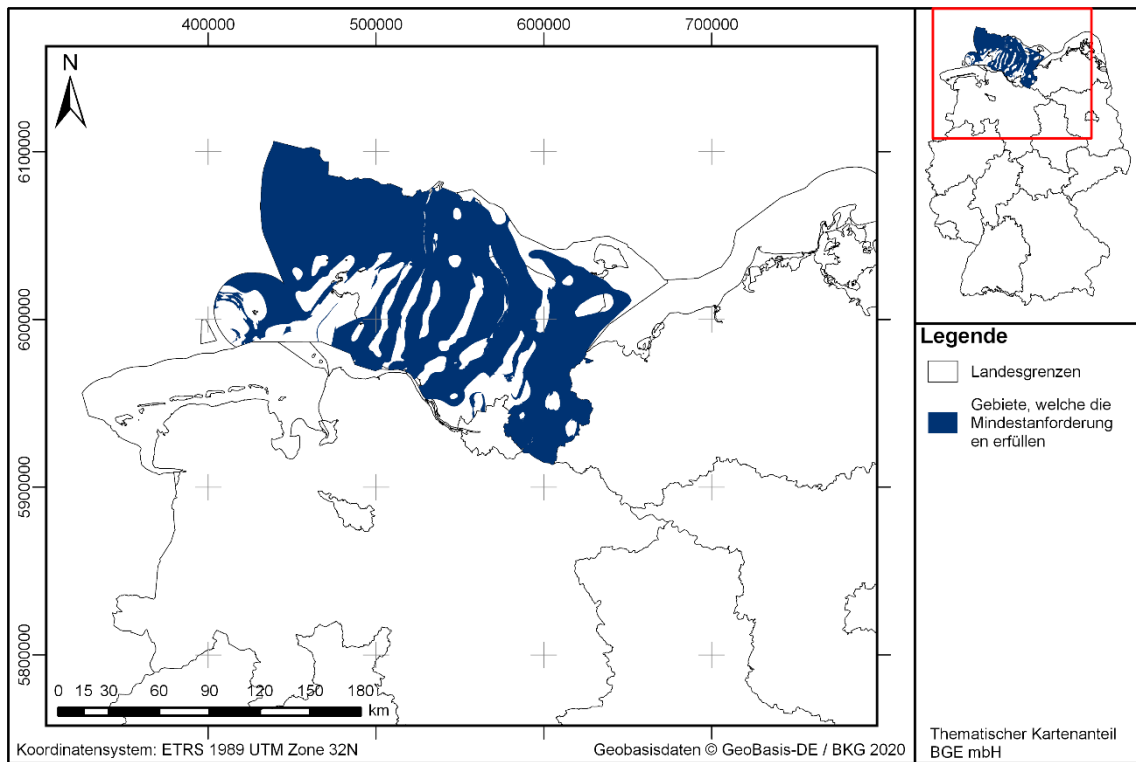


Abbildung 106: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen

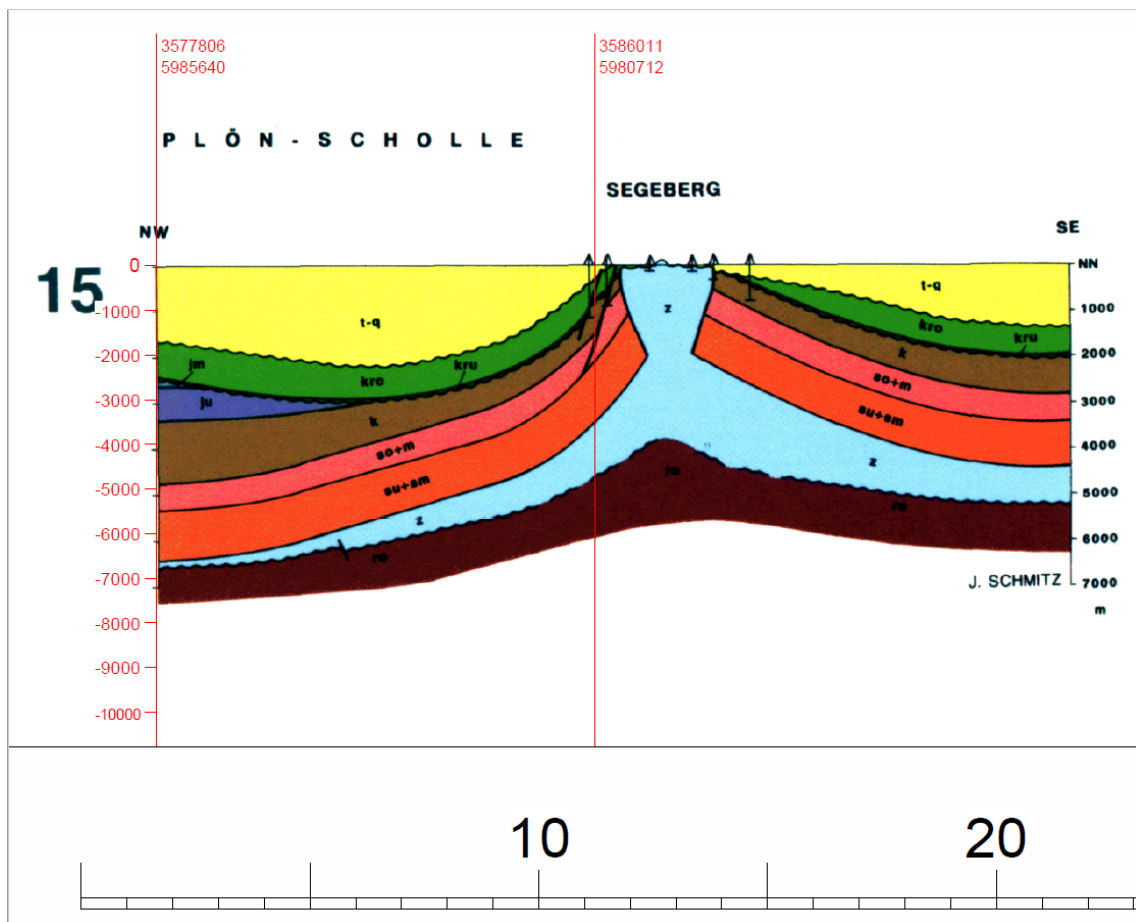


Abbildung 107: *Exemplarischer Profilschnitt (Baldschuhn et al. 2001) für die Ablagerung des Tertiär in Salinarrandsenken bei fehlender Bedeckung auf dem Top der Salinarstruktur in Schleswig-Holstein*

Tabelle 232: *Auflistung aller Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen (mit Strukturnamen, Fläche)*

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_Tertiaer_SH_1	17996
MG_t_Tertiaer_SH_2	18
MG_t_Tertiaer_SH_3	11
MG_t_Tertiaer_SH_4	14
MG_t_Tertiaer_SH_5	29
MG_t_Tertiaer_SH_6	13
MG_t_Tertiaer_SH_7	15

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 233 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 233: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank*

DokID	Dateigruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
1183973 5	6220		3D-Basismodell		3D-Modell
2385810	8906		Bohrungen aus der Bohrdatenbank der Tonstudie		Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang 1
1188151 4	9109		Bohrungen aus der Bohrdatenbank der KW-DB		Auflistung der Stammdaten der relevanten Bohrungen im Anhang 1

1.3.37 Tertiär, Landau-Fm. und Bodenheimer-Fm. – Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Tertiär, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet des Oberrheingrabens in Baden-Württemberg (BW), Rheinland-Pfalz (RP) und Hessen (HE). Mit Blick auf die Aufgaben des ewG und die damit für das Gestein geforderten Eigenschaften kommt für die Anwendung der Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) innerhalb des Tertiär die Bodenheimer-Formation und die Landau-Formation in Betracht.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die geologischen Einheiten der Landau-Formation und Bodenheimer-Formation erfolgte mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend wurden Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung war die Ausweisung von Gebieten in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Zusätzlich zu den Mindestanforderungen wurde im Zuge der Bearbeitung des Oberrheingrabens auch das Ausschlusskriterium (AK) „aktive Störungen mit Einfallen“ vorgezogen angewendet, da sich dieses nur im 3D-Raum, nicht aber im 2D-Raum anwenden lässt. Die Anwendung des AK „aktive Störungen“ ist somit auch Inhalt dieses Protokolls. Im Anschluss erfolgte eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Geographische Verbreitung

Oberrheingraben (ORG)

Der Oberrheingraben ist Teil des „Europäischen Känozoischen Rift-Systems“ (European Cenozoic Rift System ECRIS), welches sich von der Nordsee bis zum Mittelmeer erstreckt (Ziegler 1994). Der Nordnordost-Südsüdwest streichende Oberrheingraben hat eine Nord-Süd-Erstreckung von ungefähr 300 km und einer Breite von ungefähr 36 km

(Walter 2007). Die Riftentwicklung begann im mittleren bis späten Eozän und ist geprägt durch mehrere Subsidenzphasen (Brun et al. 1992). Im Zuge der Grabenbildung kam es zur Ablagerung von fluviatil-limnisch-terrestrischen und brackisch-marinen Sedimenten (Grimm et al. 2011). Das Prä-Rift-Setting, der Rift-Prozess sowie der tektonische Rahmen sind zusammengefasst in Schumacher (2002) und Dèzes et al. (2004).

Chronostratigraphie

Tertiär, Frühes Oligozän bis Frühes Miozän

Ein Überblick über die tertiären Grabensedimente des Oberrheingrabens (spätes Eozän bis frühes Miozän) ist in der stratigraphischen Tabelle Deutschlands gegeben (Abbildung 108) und in ausführlicher Form in Grimm et al. (2011) beschrieben.

Lithostratigraphie

Bodenheim-Formation und Landau-Formation; Inventarisierungstabellen von Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen (Kapitel 5).

Als für die Endlagerung relevantes Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden im Oberrheingraben lediglich die Bodenheim-Formation (Unter-Oligozän) und die Landau-Formation (Ober-Oligozän bis Unter-Miozän) betrachtet (Abbildung 108).

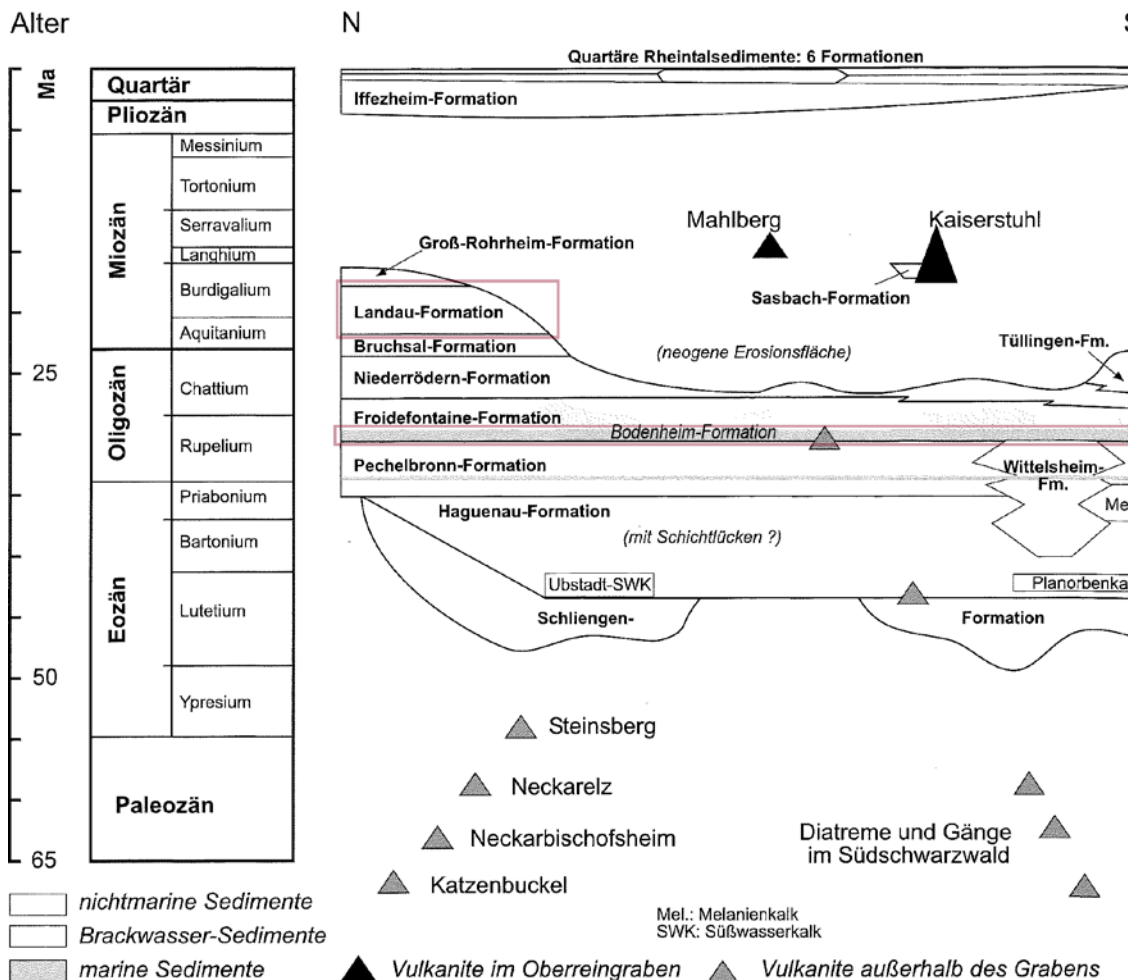


Abbildung 108: Stratigraphische Übersicht zur Formationsgliederung des Tertiär im Oberrheingraben (modifiziert nach Geyer & Gwinner 2011)

Im Rahmen der Bearbeitung wurde u. a. mit Schichtenverzeichnissen von Kohlenwasserstoffbohrungen gearbeitet, welche entgegen der neuesten, chronostratigraphischen Untergliederung auf einer lithostratigraphischen Klassifikation der Formationen beruht. Es ist daher erforderlich, diese lithostratigraphische Klassifikation mit der in dieser Bearbeitung angewandten Stratigraphie zu übersetzen.

Nach Grimm (2005) besteht die Stockstadt-Gruppe aus der Froidefontaine-, Elsass- und Worms-Subgruppe (Abbildung 109). Die Unterteilung der Stockstadt-Gruppe hat sich in der Vergangenheit mehrfach geändert, sodass eine Vielzahl von Subgruppen- und Formationsnamen existieren, deren Korrelation nicht trivial ist. Auf Grund der Komplexität der Grabenfüllung und entsprechender stratigraphischer Zuordnungen im Oberrheingraben werden im Folgenden lediglich die für die Endlagerung in Frage kommenden Tongesteinsformationen näher beschrieben. Diese sind die aus dem Mainzer Becken als **Bodenheim-Formation** bekannte Tonsteinformation als Teil der **Froidefontaine-Subgruppe** (ehem. Rupelton entsprechend der lithostratigraphischen Klassifizierung der Kohlenwasserstoffindustrie) und die **Landau-Formation** als Teil der **Worms-Subgruppe** (ehem. Obere- und Untere Hydrobienschichten entsprechend der lithostratigraphischen Klassifizierung der Kohlenwasserstoffindustrie).

Nördlicher bis mittlerer Oberrheingraben				Südliches Mainzer Becken				
STOCKSTADT - GRUPPE	Worms-Subgruppe	Landau-Formation	o.T.	Frankfurt-Formation (= Obere Hydrobienschichten)				MAINZ - GRUPPE
				Wiesbaden-Formation (= Untere Hydrobienschichten)				
			m.T.	Rüssingen-Formation (= <i>Inflata</i> -Schichten)				
				Oberrad-Formation (= Obere Cerithienschichten, o.T.)				
			u.T.	Oppenheim-Formation (= Obere Cerithienschichten, u.T.)				
	Bruchsal-Formation	o.T.	Bändermergel	Hochheim-Formation (= Mittlere Cerithienschichten oder Landschneckenkalk)				
			u.T.	Ostracoden-Schichten	Weisenau-Formation (= Untere Cerithienschichten)			
	Elsass-Subgruppe	Niederrödern-Formation		Jakobsberg-Formation (= Süßwasserschichten)				SELZTAL - GRUPPE
	Froidefontaine-Subgruppe (= Graue Schichtenfolge)	Karlsruhe-Formation	Cyrenenmergel	Sulzheim-Formation				
			Meletta-Schichten	Stadecken-Formation (= Schleichsand)				
Oberer Rupelton			Alzey-Formation	Bodenheim-Formation (= Rupelton)	Rosenberg-Subformation			
Fischschiefer (= Mittlerer Rupelton)					Hochberg-Subformation			
Foraminiferenmergel (= Unterer Rupelton)			Wallau-Subformation					

 im südlichen Mainzer Becken nicht nachgewiesen

 Horizont mit Massenvorkommen der Foraminifere *Lippsina demens*

Abbildung 109: *Detaillierte Stratigraphie der Stockstadt-Gruppe im mittleren und nördlichen ORG und Korrelation mit den Formationen des Mainzer Beckens (Schäfer 2012)*

Froidefontaine-Subgruppe (Unteroligozän)

Die Froidefontaine-Subgruppe (=Graue Schichtenfolge) lässt sich nach Schäfer (2012) (Abbildung 109) im Oberrheingraben in Fischschiefer, Foraminiferenmergel und die Karlsruhe Formation untergliedern. Die aus dem Mainzer Becken definierte und in dieser Bearbeitung beschriebene Bodenheimer-Formation lässt sich unterteilen in Foraminiferenmergel, Fischschiefer und Oberen Rupelton (Schäfer 2012). Grimm et al. (2011) definieren diese Einheiten als Wallau-, Hochberg- und Rosenberg-Subformation.

Die Sedimente der **Bodenheimer-Formation** wurden im Zuge der zweiten marinen Transgression der Grabenbildung während des Rupelium (Unter-Oligozän) im gesamten Oberrheingraben abgelagert (Ru2-Transgression nach Hardenbol et al. 1998). Die Bo-

denheim-Formation ist im gesamten Oberrheingraben sowie im Mainzer Becken verbreitet (Abbildung 110) und umfasst die im Folgenden vorgestellten, in der Kohlenwasserstoffindustrie etablierten lithostratigraphischen Einheiten:

- Fischschiefer
- Foraminiferenmergel

In der Erdölgeologie wird die Bodenheimer-Formation üblicherweise als „Rupelton“ angesprochen. Es handelt sich um eine Folge geschichteter bis laminiertes Tone mit teilweise hohem Karbonatanteil mit Einschaltungen von Siltlagen und gelegentlich Kalksilten. Horizontweise treten linsenförmige Karbonatkonkretionen (Septarien) sowie Pyritbänke und -linsen auf.

Der Foraminiferenmergel (Wallau-Subformation nach Grimm et al. 2011) besteht aus Tonen bis karbonatisch-siltigen Tonen mit vereinzelt Sandeinschüttungen. Die Verbreitung erstreckt sich über den gesamten Oberrheingraben. Im nördlichen Oberrheingraben werden Mächtigkeiten bis zu 40 m erreicht, im südlichen Oberrheingraben 6 m bis 30 m.

Der Fischschiefer (Hochberg-Subformation nach Grimm et al. 2011) besteht aus bituminösen, feingeschichteten, laminierten Tonen und karbonatischen Tonen. Es werden Mächtigkeiten zwischen 3 m und 50 m erreicht, wobei die Mächtigkeiten auf Grund der Grabentektonik und Subsidenzphasen im nördlichen Oberrheingraben höher sind als im südlichen Oberrheingraben.

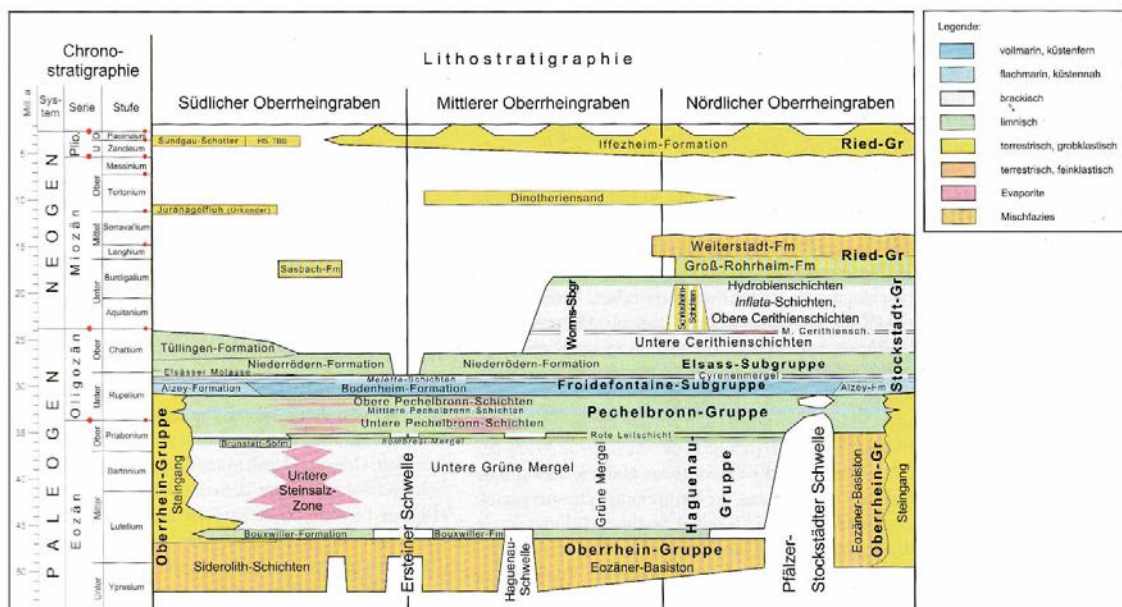


Abbildung 110: Lithostratigraphische Einstufung der tertiären Gesteinsabfolgen im Oberrheingraben (Grimm et al. 2011)

Worms Subgruppe (Oberoligozän bis Untermiozän)

Die Worms-Subgruppe lässt sich in die Bruchsal-Formation (spätes Oligozän) und die Landau-Formation (spätes Oligozän bis frühes Miozän) untergliedern (Abbildung 109).

Die Verbreitung der Worms-Subgruppe ist beschränkt auf den nördlichen- und mittleren Oberrheingraben (Abbildung 110).

Die Bruchsal-Formation umfasst im Folgenden die in der Kohlenwasserstoffindustrie etablierten lithostratigraphischen Einheiten:

- Corbicula Schichten
- Cerithien Schichten

Die im späten Oligozän abgelagerte Bruchsal-Formation wird in zwei Schichtpakete unterteilt. Die untere Bruchsal-Formation, auch als Ostracodenschichten oder – nach lithostratigraphischer Klassifizierung der Kohlenwasserstoffindustrie – als **Cerithien Schichten** bezeichnet, besteht aus grauen, graugrünen oder graubraunen Mergel- und Tonmergelsteinen mit variierenden Fein- und Mittelsandanteilen. Die Sedimente sind meist ungeschichtet, es kommen jedoch Kalk- und Dolomitsteinbänke sowie Anhydritknollen vor. Vereinzelt treten Braunkohleeinschaltungen auf. Die Sedimente sind sehr fossilreich, wobei brackisch bis limnische Mollusken- und Ostracodenfaunen dominieren.

Die obere Bruchsal-Formation wird auch Bändermergel oder – nach Kohlenwasserstoffstratigraphie – **Corbicula Schichten** genannt. Sie besteht aus feingeschichteten, mittel- bis dunkelgrauen Ton- und Tonmergelsteinen mit kalkigen Lamellen bzw. Kalk- und Dolomitsteinbänken. Die Ablagerungen sind häufig bituminös und pyritführend. Vor allem im Grabeninneren nördlich von Bruchsal nehmen zum Hangenden zudem Evaporitablagerungen zu. Der Ablagerungsraum war ein epikontinentales Randmeer. Die Bruchsal-Formation besitzt im Mittel eine Mächtigkeit von 300 m – 500 m. Die maximale Mächtigkeit beträgt 900 m (Grimm et al. 2011).

Die für die Endlagersuche genauer betrachtete **Landau-Formation** wurde von (Geyer et al. 2011) eingeführt. Die Landau-Formation wurde in einem limnisch bis brackisch-marinen Setting im Zuge kurzzeitiger mariner Transgressionen während des Chattium bis Burdigalium (Ober-Oligozän bis Unter-Miozän) abgelagert (Wirth 1954; Straub 1962). Sie umfasst im Folgenden die in der Kohlenwasserstoffindustrie etablierten lithostratigraphischen Einheiten (nach Doebl 1967):

- Obere Hydrobienschichten
- Untere Hydrobienschichten

Die Verbreitung beschränkt sich auf den mittleren und nördlichen Oberrheingraben, sowie die Übergangsbereiche zum Mainzer Becken und endet in südlicher Richtung auf der Linie Lauer – Rastatt.

Die Landau-Formation ist im Oberrheingraben durch Tonsteine und Tonmergel mit eingeschalteten Dolomitbänken charakterisiert (Grimm et al. 2011): An der Basis besteht die Formation aus grauschwarzen, bituminösen, pyritführenden Mergeln. Darüber folgen feingeschichtete bis laminierte Ton-, Tonmergel und Mergelsteine mit grüngrauer bis dunkelgrauer Farbe, die teilweise bituminös sind. Dementsprechend wird diese Abfolge

mitunter als Bändermergel bezeichnet. Die Formation enthält häufig Kalk- und Dolomitsteinbänke mit einer Mächtigkeit von bis zu 2 m. Darüber hinaus lassen sich lokale Häufungen von Anhydritknollen beobachten.

Die maximale Mächtigkeit der Landau-Formation reicht bis etwa 1000 m bei Frankenthal (Grimm et al. 2011). Im Hangenden ist die Landau-Formation konkordant durch die sandig-mergeligen Sedimente der Groß-Rohrheim-Formation der Ried-Gruppe überlagert.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 234). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 234: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	BW	UMBW	11897864/ 9543	ts	GeORG-Modell	3D-Modell des Oberrheingrabens
2	BW	UMBW	11842115/ 2840	docx	lgrb_bw_georg_RE- ADME.docx	Erläuterungen zum 3D-Modell GeORG
2	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
3	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_t ol10	Digitales Gelände- modell
4	BW	UMBW/ LGRB	11873083/ 7767	csv	datenbank_ex- port_adb	Bohrdatenbank
5	BW	UMBW	11873083_ 04/7783	pdf	Schichtenverzeich- nisse	Schichtenverzeich- nisse
6	BW	UMBW	11873083_ 01/7786	Tif/pdf/j pg	Bohrlochmessungen	Bohrlogs

Eigenrecherche

Für die Anwendung der Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien in der Landau-Formation und der Bodenheim-Formation in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen wurden neben Literaturdaten keine weiteren Karteninformationen o. ä. verwendet.

Anwendung der Mindestanforderungen § 23°StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Tertiär in den Tongesteinen des Oberrheingrabens geprüft wurde, ist in Tabelle 235 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 235: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Tertiär aus der Basisfläche Tertiär	b_BodenheimFm_t_BW_RP.ts b_LandauFm_t_BW_RP.ts
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	TopflaecheBodenheimFm_MACRO.ts TopflaecheLandauFm_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_BodenheimFm_t_BW_RP_HE_MACRORESULT.ts b_LandauFm_t_BW_RP_HE_MACRORESULT.ts
g) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	b_BodenheimFm_BW_RP_HE_MACRORESULT_AK.ts b_LandauFm_BW_RP_HE_MACRORESULT_AK.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_BodenheimFm_t_BW_RP_MACRORE-SULT_AK_qs.ts b_LandauFm_t_BW_RP_MACRORE-SULT_AK_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_BodenheimFm_t_BW_RP.dxf MG_BodenheimFm_t_BW_RP.txt MG_LandauFm_t_BW_RP_HE.dxf MG_LandauFm_t_BW_RP_HE.txt
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Einladen der .DXF Dateien aus 2i) in ArcGIS Pro	MG_BodenheimFm_t_BW_RP.dxf MG_LandauFm_t_BW_RP_HE.dxf
b) Polyline-Featureclass in Polygon umwandeln	MG_BodenheimFm MG_LandauFm
c) Zusammenführen der Polygone	MG_BodenheimFm_Merge MG_LandauFm_Merge
d) Anwendung der Ausschlusskriterien	Es mussten keine weiteren AK angewendet werden.
e) Überprüfung auf Mindestfläche (10 km ²)	MG_BodenheimFm_area MG_LandauFm_area
f) Prüfung der Bohrungsinformationen	
g) Zerschneiden in einzelne Features	
h) Löschen von zu kleinen Gebieten mit einer Fläche <10 km ²	
i) Export einer shp-Datei	MG_ORG_BodenheimFm.shp MG_ORG_LandauFm.shp

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 235 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell ist das GeORG-Modell, dass in einem EU-Projekt entstand und vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau von Baden-Württemberg (LGRB) zur Verfügung gestellt wurde. Das GeORG-Modell ist ein detailliertes

Modell des Oberrheingrabens und bildet 12 stratigraphische Einheiten sowie Störungsflächen ab (GeORG-Projektteam 2013a, 2013b), die im Zuge dieser Bearbeitung verwendeten Einheiten sind kursiv markiert:

- *Basis Lockergesteine (010_blg)*
- *Basis Landau-Formation (020_bhy)*
- *Basis Froidefontaine-Formation (040_bff)*
- Basis Tertiär (050_bt)
- Basis Oberjura (060_bjo)
- Oberfläche Hauptrogenstein (070_thr)
- Basis Unterjura (090_bju)
- Basis Keuper (100_tms)
- Oberfläche Muschelkalksalinar (110_tms)
- Basis Muschelkalk (120_bmu)
- Basis Trias (130_btr)
- Oberfläche Grundgebirge (170_tkr)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 235 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Als Bearbeitungsflächen für die tertiären Tongesteine des Oberrheingrabens wurden aus dem 3D-Modell die folgenden Flächen verwendet: Der Bearbeitung der Bodenheim-Formation diene als Basisfläche die Basis Froidefontaine-Formation (040_bff) und als Topfläche die die Basisfläche Landau-Formation. Da letztere jedoch nur im nördlichen Oberrheingraben ausgebildet ist und im mittleren bis südlichen Oberrheingraben fehlt, diene für die übrigen Bereiche des Grabens die Basisfläche Lockergesteine (010_blg) bzw das auf 300m Teufe versetzte DGM als Topfläche.

Für die Bearbeitung der Landau-Formation wurde die Basis der Landau-Formation (020_bhy) als Basisfläche im Modell betrachtet. Als Tophorizont für diese Bearbeitung wurde die Basisfläche Lockergesteine (010_blg) verwendet. Es muss erwähnt werden, dass die Bruchsal-Formation (Corbicula-Schichten und Cerithien-Schichten), die im Liegenden der Landau Formation und liegt und im Rahmen dieser Bearbeitung mit betrachtet wird, im Rahmen dieses Modellerschrittes nicht berücksichtigt werden kann. Dies ist den vorliegenden Modellhorizonten geschuldet.

Das digitale Geländemodell für Baden-Württemberg wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht.

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche (Basisfläche) und der entsprechenden Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich aus

den Basisflächen sowie der um 300 m abgesenkten Geländeoberfläche (DGM__{-300m}) zusammen. Diese wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM__{-1500m} angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert. Die Eigenschaft „Mächtigkeit“ wurde anschließend mit Hilfe von Konturlinien visualisiert. Aus den 100-m-Konturlinien wurden eine Kurve erzeugt, mit der die Basisfläche verschnitten wurde. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen für die ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert wurde (BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft und die somit nicht im Zuge der 2D-Bearbeitung ausgeschlossen werden können. Im Falle des Oberrheingrabens waren dies alle vorhandenen Störungszonen. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche der Basis wurde eine Kurve erzeugt, die mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die Qualitätskontrolle wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen anhand von Histogrammen der Eigenschaft „Mächtigkeit“ und „Tiefenlage“ überprüft sowie visuell die Plausibilität im 3D-Raum anhand von Profilschnitten kontrolliert. Es gab keinen Anpassungsbedarf. Bereiche des Oberrheingrabens, die außerhalb Deutschlands lagen, wurden gelöscht.

Die Bearbeitungsfläche Tertiär wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen abgelegt.

2D-Bearbeitung

9. Einladen der DXF-Dateien in ArcGIS.
10. Erstellen eines Polygon-Feature (Tool „Neue Feature-Class“) und kopieren der Objekte und Attribute aus der DXF-Datei in das neue Shape.
11. Auflösen der feinmaschigen Struktur (hohe Dichte an Knotenpunkten) (Tool „Dissolve“), damit nur ein Objekt vorliegt.
12. Prüfung der analysierten Bohrungen innerhalb des Oberrheingrabens auf ihre Lage.
13. Überprüfung der Lage der Fläche. Die Fläche liegt komplett innerhalb des Staatsgebietes der Bundesrepublik Deutschland. Somit ist keine weitere Beschneidung notwendig.

14. Anwendung Ausschlusskriterien: Seismizität

Zur Ausweisung von identifizierten Gebieten (resultierende Gebiete nach der Anwendung der Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien) im Tongestein im Tertiär des Oberrheingrabens wird das Ausschlusskriteriums Seismizität angewandt. Alle

anderen Ausschlusskriterien haben keine Überschneidungen mit den bisher ermittelten Gebieten.

15. Anwendung Mindestanforderungen

Die nach Anwendung der Ausschlusskriterien erhaltene Fläche liegt als Polygon vor. Diese Fläche wurde mit Hilfe des Werkzeugs „Trennen“ in ArcGIS Pro in einzelne Flächen separiert, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ geprüft werden kann. Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt.

16. Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse wurden stichprobenhaft auf die lithologischen Abfolgen der Landau-Formation und der Bodenheim-Formation geprüft. Ziel der Einsicht in Bohrakten und Schichtenverzeichnisse war es, Aussagen über die lithologische Beschaffenheit, und Mächtigkeit der Grabensedimente zu erhalten.

17. Benennung der einzelnen Gebiete („_IG_1“, ...), Erstellung einer Top-Fläche dieser Gebiete aus Tiefenlage der Basisfläche und der Mächtigkeit und anschließender Export der shape-Datei zur weiteren Bearbeitung durch die geowissenschaftliche Abwägung.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5°StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen. Lithotypen, denen Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die die Anforderung an Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Hoth et al. (2007) weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Wie aus den Inventarisierungstabellen (Kapitel 5) zu entnehmen ist, sind die Tongesteinsformationen des Tertiärs im Oberrheingraben teilweise sehr inhomogen aufgebaut. Neben Ton- und Tonmergelstein, die dominant vorliegen, enthalten die Formationen Einschaltungen von z. B. Mergel(ton)stein oder unreinen Sandsteinen. Im Folgenden wird

die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für die nach Inventarisierungstabelle relevanten Formationen der Bodenheim-Formation und der Landau-Formation analysiert:

Bodenheim-Formation

Der Bodenheim-Formation als eines der wichtigsten Muttergesteine für Kohlenwasserstoffe im Oberrheingraben können sehr hohe Tonanteile zugeordnet werden. Es ist davon auszugehen, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein innerhalb der Bodenheim-Formation **erfüllt** ist.

Da die Mächtigkeit der Bodenheim-Formation im Oberrheingraben jedoch mit kleiner 100 m unter der notwendigen Mindestmächtigkeit für Tongestein liegt, müssen auch die überlagernden Sedimente der Meletta-Schichten und Cyrenenmergel auf ihre lithologische Beschaffenheit geprüft werden. Diese Formationen sind überwiegend beschränkt marin bis brackische Ablagerungen des späten Rupelium im nördlichen Oberrheingraben. Die Sedimente sind aus Sandsteinen und siltigen Mergelsteinen aufgebaut (Grimm et al. 2011) und erfüllen somit nicht die Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit.

Ein publiziertes Standardprofil aus dem nördlichen Oberrheingraben (Straub 1962) bestätigt die lithologischen Beschreibungen sowohl für die Bodenheim-Formation als auch für die überlagernden Meletta-Schichten und Cyrenenmergel durch SP- und Widerstandsmessungen (Abbildung 111). Die homogenen, bituminösen Tonsteine der Bodenheim-Formation (Rupelton, RpC) werden überlagert von kalkigen Mergelsteinen der Cyrenenmergel (CyM) und Meletta-Schichten (ME) (Perner 2018, verändert nach Straub 1962).

Auf Grund des mangelnden Tongehalts der darüber liegenden Formationen (Meletta-Schichten und Cyrenenmergel) ist unter Berücksichtigung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ die Mindestanforderung der Gebirgsdurchlässigkeit für die Bodenheim-Formation und darüber liegender Formationen **nicht erfüllt**.

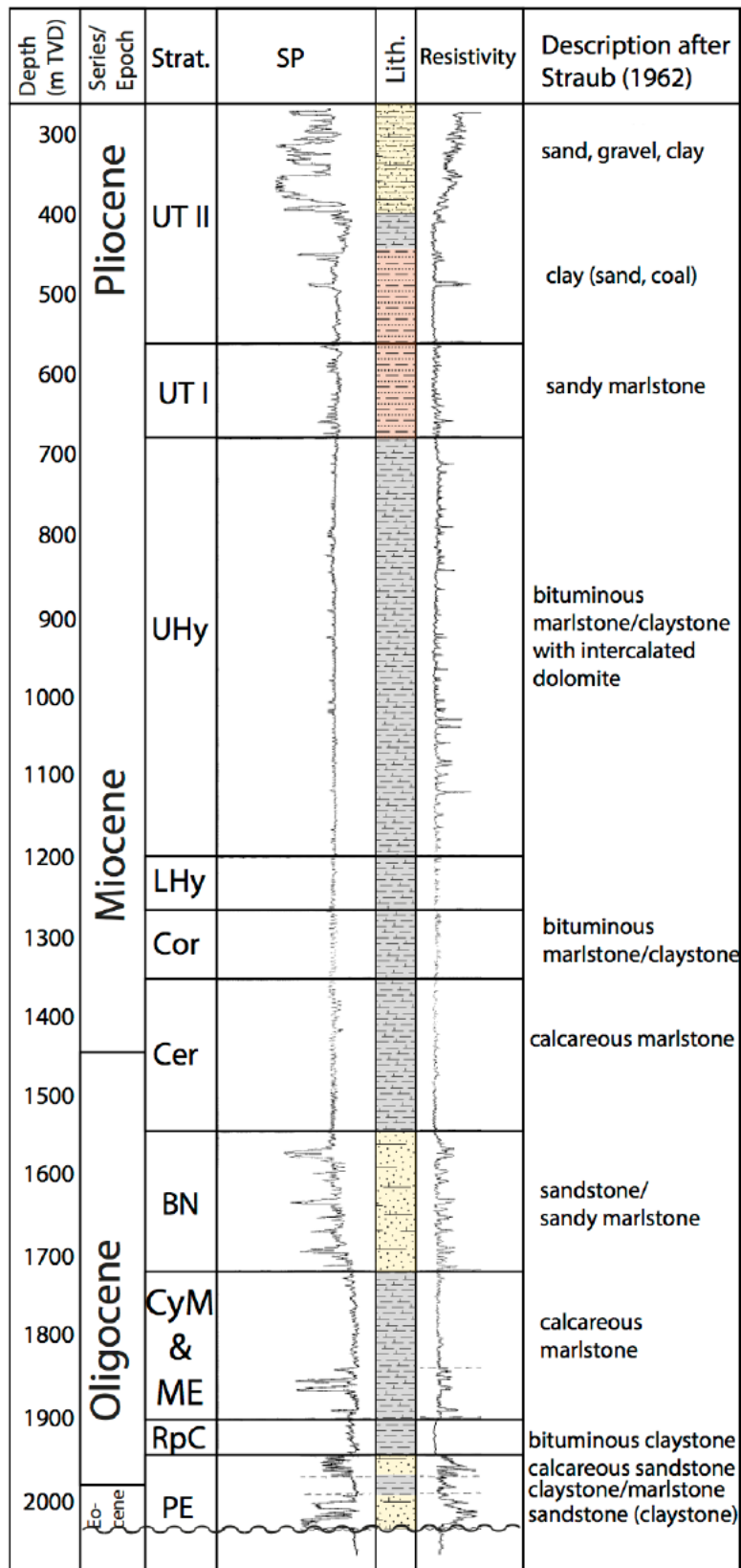


Abbildung 111: Standardprofil aus dem nördlichen Oberrheingraben mit repräsentativen SP- und Widerstandsmessungen. Die stratigraphische Einordnung bezieht sich auf die Lithostratigraphie der Kohlenwasserstoffindustrie.

Landau-Formation

Zur Beurteilung der Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ der Landau Formation wurden 48 Bohrungen aus dem nördlichen und mittleren Oberrheingraben untersucht. Schichtenverzeichnisse, die meist auf Spülprobenbeschreibungen beruhen, beschreiben insgesamt hohe Anteile an Tonstein, Tonmergelstein und Mergelstein.

Die Landau-Formation des nördlichen Oberrheingrabens ist gekennzeichnet durch mächtige Abfolgen von Tonmergelsteinen und Mergeltonsteinen, wie die Bohrungen Rheindürkheim 1 (Ifd. Nr. 183), Frankenthal 3 (Ifd. Nr. 183) und Grünstadt 1 (Ifd. Nr. 185). Ein Standardprofil aus dem Erdölfeld Stockstadt im nördlichen Oberrheingraben zeigt eine mächtige Abfolge bituminöser Mergelsteine und Tonsteine mit eingeschalteten Dolomitlagen mit entsprechenden SP- und Widerstandsmessungen (Abbildung 111).

Im mittleren Oberrheingraben ist die Landau-Formation als Wechselfolge von Mergelsteinen mit Tonmergelsteinen ausgebildet: Bellheim 1 im mittleren Oberrheingraben weist eine Mächtigkeit von 630 m auf, überwiegend bestehend aus bituminösen Mergelsteinen und Tonmergelsteinen mit Anhydrit Einschaltungen. Weitere im mittleren Oberrheingraben befindliche Bohrungen, z. B. Römerberg 3, Edesheim 1 zeigen eine mehrere Hundert Meter mächtige Abfolge von Mergelsteinen und Tonmergelsteinen, wobei die Mergelsteine meist dominieren.

Grundsätzlich weist die Landau-Formation, besonders im mittleren Oberrheingraben, starke fazielle Schwankungen auf und kann daher nicht pauschal als Tongesteinshorizont angesprochen werden. Jedoch kann zum derzeitigen Stand nicht belegt werden, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ im gesamten nördlichen und mittleren Oberrheingraben als nicht erfüllt gilt. Es wird daher angenommen, dass die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für Tongestein in der Landau-Formation des Oberrheingrabens zum jetzigen Stand der Bearbeitung als **erfüllt** gilt.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeit der tertiären Tongesteine des Oberrheingrabens wurde zwischen Top und Basis der betrachteten stratigraphischen Intervalle im 3D-Raum berechnet. Aus den 100-m-Konturlinien wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Topfläche verschnitten wurde. Geringmächtigere Teile wurden gelöscht.

Bodenheim-Formation:

Die aus dem Modell GeORG bestimmte Mächtigkeit des die Bodenheim-Formation beinhaltenden Intervalls fasst die tertiären Sedimente des Unter-Oligozäns bis Ober-Oligozäns zusammen. In dieser Modellbearbeitung werden neben der Bodenheim-Formation auch die Sedimente der Meletta-Schichten, Cyrenenmergel und Bunte Niederröderner Schichten mit betrachtet (Abbildung 108). Insbesondere die Bunten Niederröderner Schichten, aber auch die Meletta-Schichten und Cyrenenmergel, erfüllen nicht die Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit. Den vorhandenen Modellierungshorizonten geschuldet, kann zum jetzigen Zeitpunkt keine weitere Eingrenzung bzw. kein weiterer

Ausschluss dieser Formation im 3D-Raum vorgenommen werden, weshalb nach Bearbeitung des Geomodells zunächst Gebiete ausgewiesen werden können, die die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ scheinbar erfüllen.

Aus zahlreichen Bohrungen und Literaturdaten ist jedoch zu entnehmen, dass die Mächtigkeit der Bodenheim Formation im nördlichen und mittleren Oberrheingraben durchgehen unter 100 m liegt (Grimm et al. 2011; Perner 2018; Derer 2003). Für die Bodenheim-Formation wird daher die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **nicht erfüllt** betrachtet.

Landau-Formation

Die aus dem Modell bestimmte Mächtigkeit fassen die Einheiten des späten Oligozän bis frühen Miozän zusammen. Als geeignete Tongesteine wurde jedoch lediglich die Landau-Formation ausgewiesen. Jedoch lässt sich nicht ausschließen, dass auch die Sedimente der Bruchsal-Formation im Liegenden der Landau-Formation entsprechend geeignete Tongesteine aufweisen. Die ebenfalls in der Modellierung enthaltenen „Bunte Niederrödderner Schichten“ haben für die Betrachtung der Tongesteinsformationen keine Bedeutung (Abbildung 108). Zum jetzigen Zeitpunkt kann jedoch noch keine weitere Eingrenzung bzw. kein weiterer Ausschluss dieser Formation im 3D-Raum vorgenommen werden. Es ist dennoch anzunehmen, dass innerhalb der identifizierten Gebiete der insgesamt mehrere hundert Meter mächtigen Landau-Formation eine Mächtigkeit von 100 m erreicht wird. Um dies zu belegen, wurden Bohrdaten wie Schichtenverzeichnisse von Kohlenwasserstoffbohrungen hinsichtlich der Mächtigkeit der Landau-Formation (Obere und Untere Hydrobien Schichten) geprüft. Da die entsprechende Mächtigkeit von größer gleich 100 m in den identifizierten Gebieten erreicht wird, wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage wurde unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells (DGM) am vorhandenen GeoORG-Geomodell geprüft. Dabei erfüllen nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK (und oberhalb von 1500 m u. GOK) die Mindestanforderung und werden entsprechend weiter berücksichtigt. Bereiche oberhalb 300 m u. GOK und unterhalb 1500 m u. GOK wurden entsprechend aus dem Modellhorizont gelöscht.

Bodenheim-Formation

Die Tiefenlage der Bodenheim-Formation konnte anhand des 3D-Modells nur bedingt geprüft werden, da das Modell keine Top-Fläche der Bodenheim-Formation enthält und als solche entsprechend den vorhandenen Horizonten der Horizont Basis Landau-Formation verwendet werden musste.

Zusätzlich zu der Bearbeitung aus dem 3D-Modell zeigen stichprobenartig gewählte Bohrungen aus dem nördlichen und mittleren Oberrheingraben, dass der Tongesteins-horizont in erforderlicher Tiefe vorliegt.

Für die verbleibenden Gebiete die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK“ wird daher als **erfüllt** eingestuft.

Landau-Formation

Die Tiefenlage der Landau-Formation konnte anhand des 3D-Modells nur bedingt geprüft werden, da das Modell keine Top-Fläche der Landau-Formation enthält und als solche entsprechend den vorhandenen Horizonten der Horizont Basis Lockergesteine-Formation verwendet werden musste. Es ist daher notwendig, dass die ausgewiesenen Gebiete in der weiteren Bearbeitung in Hinblick auf die erforderliche „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ angepasst werden.

Für die ausgewiesenen Gebiete der Landau-Formation wird zum jetzigen Stand die Mindestanforderung „Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK“ als **erfüllt** eingestuft (BGE 2020j).

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Teilflächen der Gebiete der Bodenheim-Formation und der Landau-Formation, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft.

Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Zusammenfassende Bewertung

Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Im Oberrheingraben in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen können Gebiete ausgewiesen werden, in denen die Formationen der tertiären Grabenfüllung alle Anforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen.

Da die Bodenheim-Formation nicht alle Mindestanforderung gemäß § 23 Abs. 2 StandAG erfüllt, wird diese Formation in der weiteren Bearbeitung nicht mehr betrachtet. Die modellierten Ergebnisse sind dennoch in Abbildung 112 dargestellt. Die Landau Formation hingegen erfüllt zum derzeitigen Stand alle Mindestanforderungen. Die aus der Bearbeitung resultierenden Teilflächen sind im Ergebnismodell in Abbildung 113 dargestellt.

Ergebnis

In Abbildung 112 und Abbildung 113 sind die Ergebnisse der Bearbeitung zu den Mindestanforderungen für die Bodenheim-Formation und die Landau-Formation in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen dargestellt. Zusätzlich zu den Mindestanforderungen wurde auch das Ausschlusskriterium „aktive Störungen mit Einfallen“ angewendet, da dieses im Zuge der Bearbeitung bereits im 3D-Raum im Zuge der Modellierung angewendet werden musste. Abbildung 114 zeigt einen geologischen Profilschnitt durch den Oberrheingraben, der die Lagerung der verschiedenen tertiären Formationen des Tertiär in Baden-Württemberg zeigt.

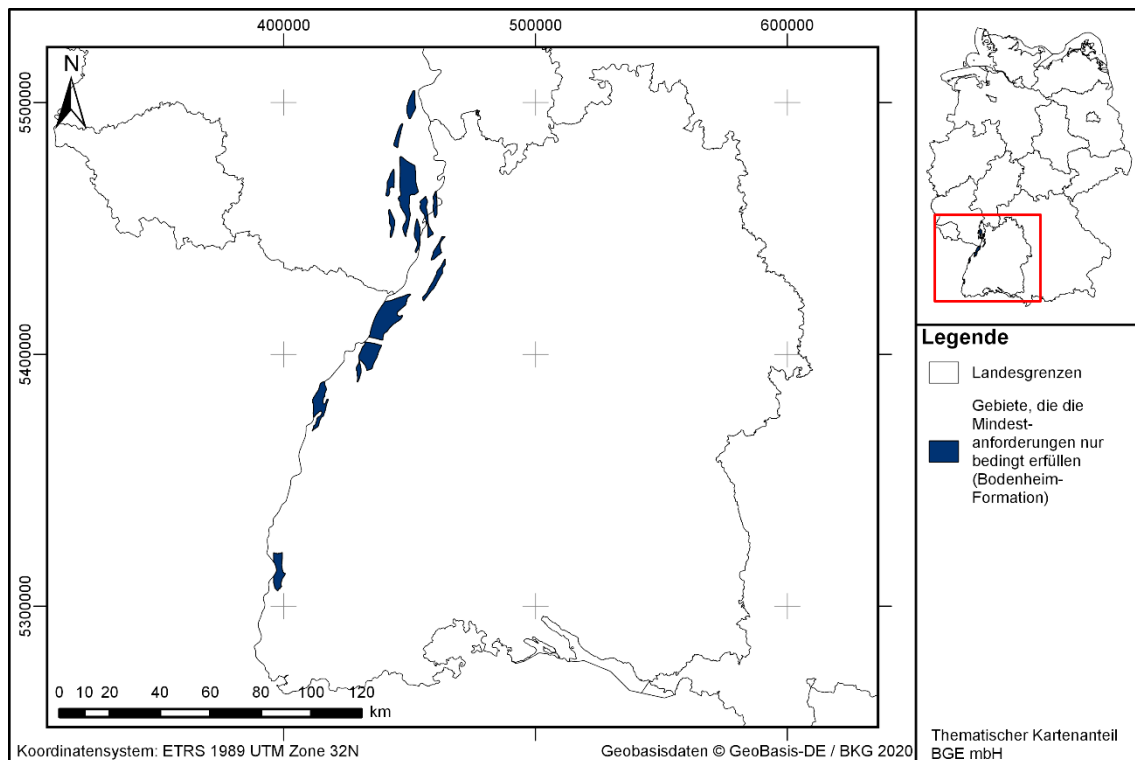


Abbildung 112: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen der Bodenheim-Formation

Eine Auflistung dieser die Mindestanforderung erfüllenden Gebiete ist in Tabelle 236 zu finden.

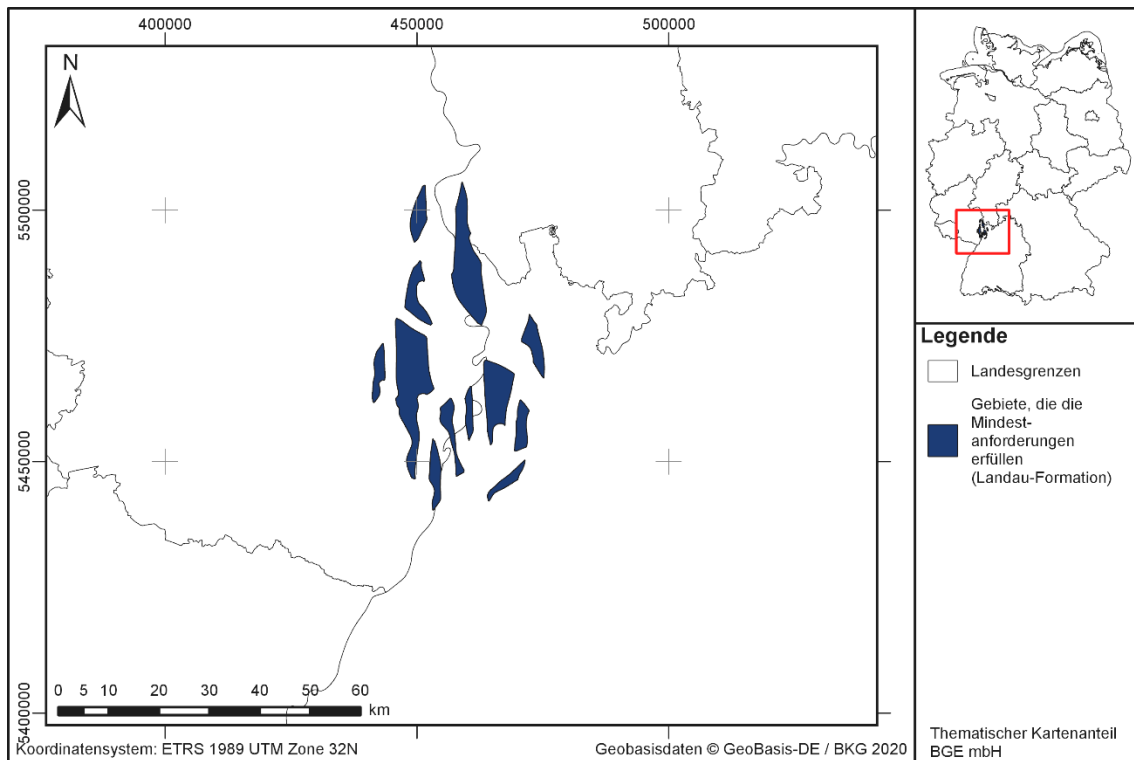


Abbildung 113: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen der Landau-Formation

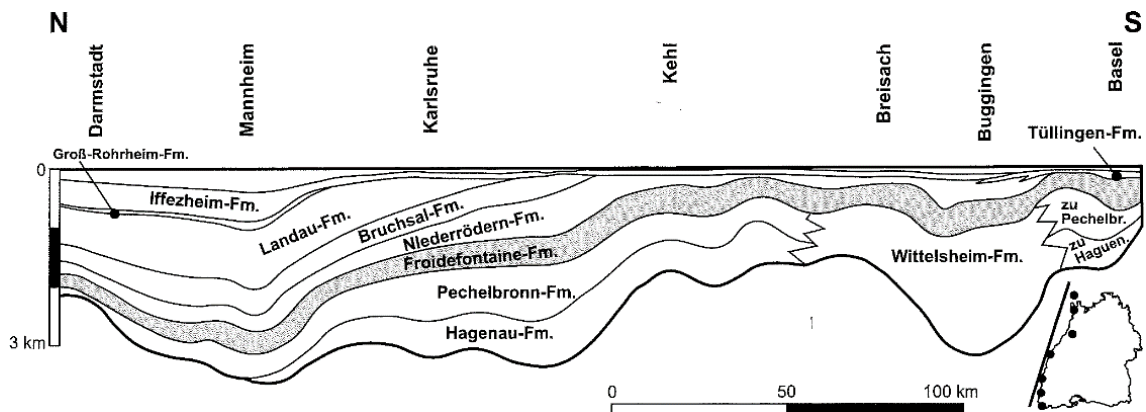


Abbildung 114: Profilschnitt durch den Oberrheingraben (Geyer et al. 2011)

Tabelle 236: Auflistung aller Gebiete welche nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungen mit Einfallen“ die Mindestanforderungen erfüllen

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_1	13
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_2	21
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_3	19
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_4	21

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_5	12
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_6	61
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_7	18
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_8	125
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_9	26
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_10	28
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_11	23
MG_t_LandauFm_BW_RP_HE_12	99
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_1	44
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_2	56
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_3	70
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_4	130
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_5	25
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_6	15
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_7	19
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_8	13
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_9	24
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_10	12
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_11	18
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_12	124
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_13	12
MG_t_BodenheimFm_BW_RP_HE_14	25

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 237 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 237: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank*

DokID	Datei- gruppe	Datei-ID	Dateiname	Beschreibung
11897864	9543		GeORG	3D-Modell des Oberrheingrabens
11873083	7767		datenbank_ex- port_adb	Die SV der entscheidungserheblichen Bohrungen sind in Anhang 1 aufgeführt.

1.3.38 Tertiär, Untere Meeresmolasse – Bayern

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Einheit Tertiär, welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet im süddeutschen Molassebecken.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen. Ergänzend werden thematische Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographische Karten) und Bohrungsdaten zugrunde gelegt.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten im süddeutschen Molassebecken, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (vgl. Anhang der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Stratigraphie

Tertiär, Oberes Eozän bis Oberes Miozän

Die Sedimente der nordalpinen Molasse können aufgrund großräumiger Transgressionen und Regressionen in sechs lithostratigraphische Gruppen eingeteilt werden: die Untere Meeresmolasse (UMM) im Oligozän, die Untere Brackwassermolasse (UBM) und die Untere Süßwassermolasse (USM) im Oberen Oligozän und Unteren Miozän, die Obere Meeresmolasse (OMM) im Unteren Miozän, die Obere Brackwassermolasse (OBM) am Ende des Unteren Miozäns und die Obere Süßwassermolasse (OSM) im Mittleren und Oberen Miozän (Doppler et al. 2005). Alle Stufen sind in der nordalpinen Molasse Bayerns verbreitet, oftmals unter einer Überdeckung von quartären glazialen und fluvio-glazialen Sedimente. Als Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2 der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“, BGE 2020j) werden Tonmergel der Unteren Meeresmolasse betrachtet.

Eine Zusammenstellung über die stratigraphischen Einheiten des nordalpinen Molassebeckens und deren lithologischer Ausprägung kann der tabellarischen Übersicht Bayerns (Kapitel 5) entnommen werden.

Geographische Verbreitung

Die nordalpine Molasse wird in die ungefaltete, autochthone Vorlandmolasse und die allochthone Faltenmolasse untergliedert (Doppler et al. 2005). Die Sedimente der Faltenmolasse (größtenteils UMM und USM) sind in die Orogenese der Alpen mit einbezogen und überschoben und verformt worden (Meschede 2018). Große Teile der UMM befinden sich heutzutage südlich der Alpenen Deformationsfront (Kuhlemann & Kempf 2002). Die Vorlandmolasse ist dagegen weitgehend unverformt. Sie ist zwischen dem heutigen Alpennordrand im Süden, dem Schwarzwald, dem Südwestdeutschen Schichtstufenland und der Bayerisch-Böhmischen Masse im Norden im Gebiet der heutigen Schweiz, Deutschland und Österreich verbreitet.

Fazies/Ablagerungsraum

Das Molassebecken ist das orogene Vorlandbecken der Alpen, in dem deren Abtragungsschutt als Sedimente abgelagert werden. Raum für diese Sedimente wurde durch die Auflast der nach Norden auf die mitteleuropäische Kruste geschobenen alpinen Decken geschaffen. Das Ablagerungsmilieu des Molassebeckens änderte sich vom Oberen Eozän bis zum Oberen Miozän mehrfach von marin über brackisch zu lakustrin-fluviatil. Die verschiedenen Ablagerungsniveaus wurden maßgeblich durch die tektonische Entwicklung der Alpen bestimmt. Die Stärke der tektonischen Aktivität bestimmte die Sedimentmenge, welche wiederum das Ablagerungsmilieu, marin oder terrestrisch, beeinflusste (Kuhlemann & Kempf 2002). Neben der tektonischen Aktivität hatten auch globale Faktoren wie eustatische Meeresspiegelschwankungen Auswirkungen auf das Ablagerungsmilieu (Haq et al. 1988).

Die Vorlandmolasse ist in drei Ablagerungsbereiche geteilt: die westliche Vorlandmolasse westlich der Iller, die mittlere Vorlandmolasse zwischen Iller und Lech und die östliche Vorlandmolasse östliche des Lech (Doppler et al. 2005).

In der Westmolasse umfasst die UMM einen voll ausgeprägten Sedimentationszyklus von Transgression und Regression, in der Ostmolasse zwei schwächere (Freudenberger & Schwerd 1996). In der gesamten UMM wurden ab dem frühen Rupelium die Schöneck-Formation (ehemals Fischeschiefer), dann der Helle Mergelkalk und die Bändermergel, dann in größerer Mächtigkeit die Tonmergelschichten in mariner Fazies abgelagert (Doppler et al. 2005).

In der Westmolasse begann mit dem Chattium die Sedimentation der Bausteinschichten-Sande, die den Übergang zur Unteren Süßwassermolasse mit ihren in fluviatiler bis lakustriner Fazies abgelagerten Mergeln, Sandsteinen und Konglomeraten bilden. Im Übergang zur Ostmolasse wurden die brackisch-lagunären Sedimente und paralischen Kohlen der Unteren Brackwassermolasse abgelagert (Doppler et al. 2005). In der Ostmolasse lag dagegen durchgehend ein mariner Ablagerungsraum vor. Dort gehen die Tonmergelschichten im höheren Rupelium in den „Rupel“-Tonmergel über. Ungefähr analog zu den Bausteinschichten erfolgte die Sedimentation der Liegenden Tonmergel, mit denen die ältere UMM endet. Die jüngere UMM ist parallel zur USM und UBM. Nach einer Regression im Chattium, die zur Ablagerung der „Chatt“-Sande führte, erfolgte eine

erneute Transgression und die Ablagerung der Hangenden Tonmergel im höheren Chattium. Diese werden gefolgt von der „Aquitän“-Sand-Mergel-Folge und dem „Aquitän“-Fischschiefer, womit die Folgen der UMM durch eine großflächige Regression beendet wurden, auf die ein Hiatus folgte.

Die Tonstein- und Tonmergelschichten der UMM werden im Folgenden genauer betrachtet.

Lithologie

Ältere UMM

Die Schöneck-Formation (vormals Fischschiefer) an der Basis der UMM besteht aus dunklen bituminösen Tonsteinen. Wegen des reichlichen Vorkommens von Fischschuppen wurde diese Schicht auch Fischschiefer genannt (Doppler et al. 2005).

Heller Mergelkalk: Sehr harter Coccolithen-Kalk (Freudenberger & Schwerd 1996).

Bändermergel: Schwach sandig, dunkelbraungraue Mergel mit geringmächtigen Coccolithenkalklagen (Freudenberger & Schwerd 1996).

Tonmergel-Schichten (westliche Vorlandmolasse): Tonmergel, zuoberst auch sandhaltig (Doppler et al. 2005). Grauer Schelfschlick (Freudenberger & Schwerd 1996). Fehlt in der schwäbischen Molasse.

Bausteinschichten: gebankte Kalk-Dolomit-Arenite mit untergeordneten Konglomeraten (Doppler et al. 2005). Strandsande (Freudenberger & Schwerd 1996).

„Rupel“-Tonmergel (mittlere bis östliche Vorlandmolasse, analog zu Tonmergelschichten im Westen): Dunkel- bis mittelgraue, schluffige bis feinsandige Tonmergel. Lokal fein- bis mittelkörnige Sandeinschaltungen (Isener Gassand) (Freudenberger & Schwerd 1996). Zwischen Isar und Inn als Mergel und lokal als Sandstein ausgeprägt, in sublitoralem bis bathyalem Milieu mit Bausteinschichten aus Westen verzahnt (Freudenberger & Schwerd 1996).

Liegende Tonmergel: Übergang von „Rupel“-Tonmergel ohne fazielle Differenzierung, Obergrenze faunistisch (Freudenberger & Schwerd 1996).

Jüngere UMM

„Chatt“-Sand (Mittlere und östliche Vorlandmolasse): Fein- bis Mittelsandfolge, marin bis brackisches Milieu, wechselnd mächtige graue Ton- bis Sandmergelzwischenlagen. Zum Hangenden erosiv begrenzt. Östlich Chiemsee tiefermarine tonige Schichten mit eingeschalteten Schuttströmen (Freudenberger & Schwerd 1996).

Hangende Tonmergel: Östlich München, marine, braungrau gefärbte Mergelabfolge, gegen Westen Sandeinschaltungen (Freudenberger & Schwerd 1996).

„Aquitän“-Sand-Mergel-Folge: Graue Tonmergel, Fein- bis Mittelsande (nach oben gröber werdend), mit höherer USM verzahnt (Freudenberger & Schwerd 1996).

„Aquitán“-Fischschiefer: Auf südlichste Vorlandmolasse begrenzt. Bituminöse Mergel (Freudenberger & Schwerd 1996).

Aufgrund ihrer Lithologie sind der Helle Mergelkalk, die Bändermergel, die Bausteinschichten, die „Chatt“-Sande und die „Aquitán“-Sand-Mergel-Folge erfüllen nicht die Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit und wurden nicht inventarisiert.

Mächtigkeit

Die Schöneck-Formation (vormals Fischschiefer) an der Basis der UMM ist im Westen wenige Meter, im Osten bis zu 30 m mächtig (Doppler et al. 2005). Der Helle Mergelkalk ist bis 15 m mächtig, die Bändermergel bis 60 m (Freudenberger & Schwerd 1996). Die Tonmergel-Schichten der westlichen Vorlandmolasse erreichen im Süden bis zu 1800 m Mächtigkeit (Doppler et al. 2005). Die Tonmergel-Schichten / „Rupel“-Tonmergel / Liegende Tonmergel der mittleren Vorlandmolasse sind ungefähr 800 m mächtig. Die „Chatt“-Sande weisen Mächtigkeiten bis 1700 m auf (Freudenberger & Schwerd 1996). Die Hangenden Tonmergel der östlichen Vorlandmolasse sind bis 1500 m mächtig (Doppler et al. 2005). Die „Aquitán“-Sand-Mergel-Folge erreicht bis 1000 m Mächtigkeit, der „Aquitán“-Fischschiefer bis 200 m (Freudenberger & Schwerd 1996).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 238). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 238: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	LfU	11877029/ 9006	ts	GeoMol FWM	Übersichtsmodell GeoMol FWM (GeoMol Team 2015)
3	BY	LfU	11873385 /7698	accdb	Bohrungen	Stammdaten und Schichtenverzeichnisse Bohrungen, Bayerische Bohrdatenbank
4	DE	BKG	11865482/ 8853	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales-Gelände- Modell

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Beschreibung
5	BY	LfU	11842369/ 7862	pdf	\Geolog_Kar- ten_Teil1_Erläute- rungen\Erl_GK500	Erläuterungen zur Geologischen Karte (Freudenberger & Schwerd 1996)

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Tertiär im süddeutschen Molassebecken geprüft wurde, ist in Tabelle 239 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 239: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen, die in den folgenden Abschnitten beschreiben wird

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCADTM)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1500 m (DGM_-1500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts
b) Bearbeitung der älteren Unteren Meeresmolasse (UMMA)	
c) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_UMMA_MACRORESULT.ts
g) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	b_UMMA_MACRORESULT_AK.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_UMMA_MACRORESULT_qs.ts

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_T_t_UMMA.dxf
j) Bearbeitung der jüngeren Unteren Meeresmolasse (UMMJ)	
k) Topfläche erzeugen: aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m) eine neue Topfläche erzeugen und tiefere Bereiche auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	Topflaeche_MACRO.ts
l) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1500m anheben	
m) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, entfernen	
n) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m löschen	b_UMMJ_MACRORESULT.ts
o) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Löschen der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete	b_UMMJ_MACRORESULT_AK.ts
p) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_UMMJ_MACRORESULT_qs.ts
q) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_T_t_UMMJ.dxf
3. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
a) Vektorisierung des Verbreitungsgebietes der sandigen Fazies in Abb.4.4-4 aus Freudenberger & Schwerd (1996) in ArcGIS Pro (Feature erstellen, Feature ändern)	SANDVERBREITUNG_OBERES_EGER.shp, Paleogeo_OberesEger_PuchkirchenSand.shp
b) Import der Flächen aus 2i und 2q als DXF in ArcGIS Pro	20200728_T_t_BY_UMMA.dxf; 20200728_T_t_BY_UMMJ.dxf
c) Polygon aus DXF-Import ohne z-Werte exportieren	c20200728_T_t_BY_UMMAPolygon_CopyFeatures; c20200728_T_t_BY_UMMJPolygon_CopyFeatures

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Dreiecksflächen auflösen – Bearbeitung, Werkzeug „Dissolve“/“Auflösen“	c20200728_T_t_BY_UMMA_Flaeche_ohneAK; c20200728_T_t_BY_UMMJ_Flaeche_ohneAK
e) nur UMMJ: Verschneiden mit Sandverbreitung des Oberen Egger (3a), Überschneidungsfläche verwerfen – Bearbeitung, Werkzeug „Aus schneiden“ mit Verwerfen	c20200728_T_t_BY_UMMJ_Flaeche_ohneAK_ohneSand
f) Separieren der Fläche in Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Trennen“	
g) Entfernen aller Flächen mit einer Fläche kleiner als 10 km ² und Benennung der Gebiete, Attribut MG_ID	
h) Entfernen einer nicht plausiblen Aussparung 0,13*829,21 m aus MG_t_tUMMJ_BY_11 – Bearbeitung, Ändern – zwei Stützpunkte entfernt	c20200728_T_t_BY_UMMA_Flaeche_ohneAK c20200728_T_t_BY_UMMJ_Flaeche_ohneAK_ohneSand

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 239 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell ist das GeoMol-Übersichtsmodell des bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU). Das GeoMol-Modell wurde im Zuge eines grenzüberschreitendes EU-Projektes erstellt und beinhaltet 9 stratigraphische Einheiten (von Top Grundgebirge bis Basis Obere Meeresmolasse) sowie eine Topographiefäche. Das Modell betrachtet den Bereich des bayerischen Molassebeckens bis etwa dem Beginn der Fränkischen Alb. Folgende Flächen wurden modelliert; ob als Basis- oder Topfläche ist dem Präfix B_ bzw T_ zu entnehmen:

7 Basishorizonte (B_):

- B_Q = Basis Quartär
- B_OSM = Basis Ob. Süßwassermolasse
- B_OMM = Basis Ob. Meeresmolasse
- B_OMME = Basis Ältere Ob. Meeresmolasse
- B_UMJ = Basis Jüngere Unt. Meeresmolasse
- B_UMA = Basis Ältere Unt. Meeresmolasse

- B_T = Basis Tertiär

6 Tophorizonte (T_):

- T_JU = Top Ob. Jura
- T_JM = Top Mittlerer Jura
- T_RJL = Top Rhaetium–Unterjura
- T_Tr = Top Trias
- T_B = Top Grundgebirge (Basement)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 239 schrittweise beschrieben. Die Modellierung wurde größtenteils mit einem Makro durchgeführt, so dass die Arbeitsschritte Nr. 2a – f und j – n) automatisiert generiert wurden. Die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Für die Bearbeitungsfläche UMMA wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche B_UMA und für die Bearbeitungsfläche UMMJ die Basisfläche B_UMJ verwendet (Tabelle 239).

Das digitale Geländemodell für Bayern wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, wurde auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht.

Die Mächtigkeit wurde mittels kürzester Distanz zwischen der Bearbeitungsfläche UMMA bzw. UMMJ und der jeweiligen Topfläche berechnet. Die Topfläche setzt sich für die UMMA aus den Basisflächen der Jüngerer Unteren Meeresmolasse (B_UMJ), der Oberen Meeresmolasse (B_OMM), der Oberen Süßwassermolasse (B_OSM) und des Quartär (B_Q) zusammen. Die Topfläche der UMMJ besteht aus der Basis der Oberen Meeresmolasse (B_OMM). Randstücke der UMMA und der UMMJ in Alpennähe und ohne Überdeckung durch die Topfläche wurden aufgrund des steilen Abtauchens der Schichten und der dadurch resultierenden nicht-endlagerrelevante Teufe ausgeschnitten. Die Basisflächen wurden zu einer Fläche zusammengefügt und Bereiche unterhalb von 1500 m u. GOK auf die Tiefenlage des DGM_-1500m angehoben. Das Ergebnis der Mächtigkeitsberechnung wurde als Eigenschaft „Mächtigkeit“ in den Attributen der Bearbeitungsfläche gespeichert.

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen für die ein Sicherheitsabstand von allseitig 1000 m definiert wurde (BGE 2020h). Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen, deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt, mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden gelöscht.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurden die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (Mächtigkeiten ab 100 m, endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1500 m u. GOK) eingehalten werden.

Die Bearbeitungsflächen der UMMA und der UMMJ wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.1 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben.

2D-Bearbeitung

Für die in Tabelle 239 beschriebene 2D-Bearbeitung wurde das GIS-Programm ArcGIS Pro in der Version 2.3.2 verwendet.

Kartenmaterial

Zur Ausweisung von identifizierten Gebieten im Tongestein in der Unteren Meeresmolasse in Bayern wurde die Verbreitungskarte georeferenziert und vektorisiert.

Die Basisfläche der Verbreitung der jüngeren Unteren Meeresmolasse aus dem 3D-Modell (Tabelle 239, 2q) wurde mit Hilfe der thematischen Karte beschnitten (Tabelle 239, 3a, 3e). In diesem Schritt wurden die Flächen der Unteren Süßwassermolasse und der Unteren Brackwassermolasse durch die Beschneidung auf die Tiefwasserfazies östlich der Sandverbreitungsgrenze entfernt. Die dadurch erhaltene Fläche liegt ebenso wie die der älteren Unteren Meeresmolasse als ein Polygon vor. Diese Flächen wurde mit Hilfe des Werkzeugs „Trennen“ in ArcGIS Pro in einzelne Flächen separiert, sodass nicht zusammenhängende Gebiete als einzelne Flächen ausgewiesen und die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ geprüft werden kann (Tabelle 239, 3f). Alle Gebiete mit einer Fläche von weniger als 10 km² wurden entfernt (Tabelle 239, 3g).

Allgemeine Literatur

Die Literaturgrundlage bildet „Die Gliederung des Tertiärs im süddeutschen Molassebecken“ zur Stratigraphie des Molassebeckens (Doppler et al. 2005), sowie die „Erläuterungen zur Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000“ (Freudenberger & Schwerd 1996). Unterstützend findet die „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ (Hoth et al. 2007) Anwendung. Diese Studien wurden zur weiteren Beurteilung der mit dem verwendeten Kartenmaterial erstellten Flächen zur Verbreitung der Tongesteine herangezogen.

Bohrdaten

Bohrakten und Schichtenverzeichnisse aus der Bohrdatenbank Bayern (vgl. Tabelle 241) wurden stichprobenhaft auf die kumulative Mächtigkeit der Tonmergelabfolgen der Unteren Meeresmolasse und die Tiefenlage zwischen 300 m und 1500 m u. GOK geprüft. Acht Bohrungen erfüllen dabei die vorgenannten Mindestanforderungen für die ältere Untere Meeresmolasse und befinden sich in der auf Grundlage des Kartenmaterials ausgewiesenen Fläche (vgl. Anhang). Die kumulative Mächtigkeit der Ton-

mergel in diesen acht Bohrungen liegt zwischen 158 m und 272 m. Die Gas- und Ölvorkommen der Molasse liegen an Störungen, dementsprechend ist dort ein großer Teil der Bohrungen verortet (GeoMol Team 2015). Nach Schritt Nr. 2o der 3D-Bearbeitung sind die Pufferzonen um die Störungen aus der ausgewiesenen Fläche entfernt, damit liegen auch diese Bohrungen nicht mehr in der Fläche.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung geringe Permeabilitäten bzw. niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Neuzil 1994; Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Dabei wird die Durchlässigkeit direkt von der mineralogischen sowie textuellen Zusammensetzung beeinflusst und variiert mit unterschiedlichen regionalgeologischen Verhältnissen. Als gute Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit kann die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen werden. Hoth et al. (2007) konnten einen generellen Zusammenhang zwischen Lithotypen (mit entsprechendem Tonanteil) und der Gebirgsdurchlässigkeit bestätigen. Lithotypen, denen Tonanteile größer 80 % zugeordnet werden, weisen Gebirgsdurchlässigkeiten auf, die die Anforderung an Mindestanforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen. Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % lassen sich mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von kleiner als oder gleich 100 pm/s korrelieren und erfüllen die Mindestanforderungen teilweise. Hoth et al. (2007) weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Tonanteil ein Hilfsmittel ist, der für die großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen benutzt wurde und nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann.

Wie aus der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) zu entnehmen ist, sind sowohl die ältere als auch die jüngere Untere Meeresmolasse inhomogen aufgebaut. Neben Tonmergelsteinen, die dominant vorliegen, enthalten die UMMA und die UMMJ auch mächtige Schichten von z. B. Sandsteinen, Mergeln und diverse Wechselfolgen von z. B. Ton-Silt-Sand oder Sand-Mergel. Jedoch beinhalten sowohl die UMMA als auch die UMMJ mächtige, weitgehend homogene Einheiten von Tonmergel (Tonanteil 60 % bis 80 %).

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird daher erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongestein der Unteren Meeresmolasse in den verbleibenden Gebieten des Molassebeckens **erfüllt** ist.

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mächtigkeiten der Älteren sowie der Jüngeren Meeresmolasse wurden im 3D-Raum berechnet. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Die aus dem Modell bestimmten Mächtigkeiten fassen die Einheiten der gesamten stratigraphischen Einheiten der Älteren bzw. der Jüngeren Unteren Meeresmolasse zusammen. Als geeignete Tongesteins-Formationen innerhalb der älteren Unteren Meeresmolasse wurden jedoch lediglich die Tonmergel-Schichten und die Liegenden Tonmergel,

innerhalb der jüngeren Meeresmolasse nur die Hangenden Tonmergel identifiziert. Innerhalb der UMMA und der UMMJ gibt es jeweils auch sandige und karbonatische Schichten wie z. B. den Bändermergel, den Chatt-Sand oder die Aquitan-Sand-Mergel-Folgen. Es ist daher möglich, dass in Teilen des ausgewiesenen Gebietes eine Mächtigkeit der Tonmergel von 100 m nicht erreicht wird. Zum jetzigen Zeitpunkt kann jedoch keine weitere Eingrenzung vorgenommen werden. Es wurden jedoch Bohrdaten hinsichtlich der Mächtigkeiten der Tonmergelformationen innerhalb der UMMA und der UMMJ überprüft. 8 Bohrungen in den Verbreitungsgebieten der UMMA und 13 Bohrungen in den Verbreitungsgebieten der UMMJ ergaben Mächtigkeiten der Tonmergelformationen von mehr als 100 m. Daher wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches“ in den verbleibenden Gebieten als **erfüllt** betrachtet.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 3)

Die Tiefenlage der Unteren Meeresmolasse wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Außerdem wurde eine maximale Teufe von 1500 m u. GOK angesetzt, die erfüllt wurde. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als zunächst **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für Tongesteine wird ein Flächenbedarf von mindestens 10 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 115 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die Einheit ältere Untere Meeresmolasse in Bayern dargestellt. Abbildung 116 zeigt das Ergebnis der Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen für die jüngere Untere Meeresmolasse in Bayern.

Abbildung 117 zeigt einen Nord-Süd orientierten Profilschnitt durch das Molassebecken.

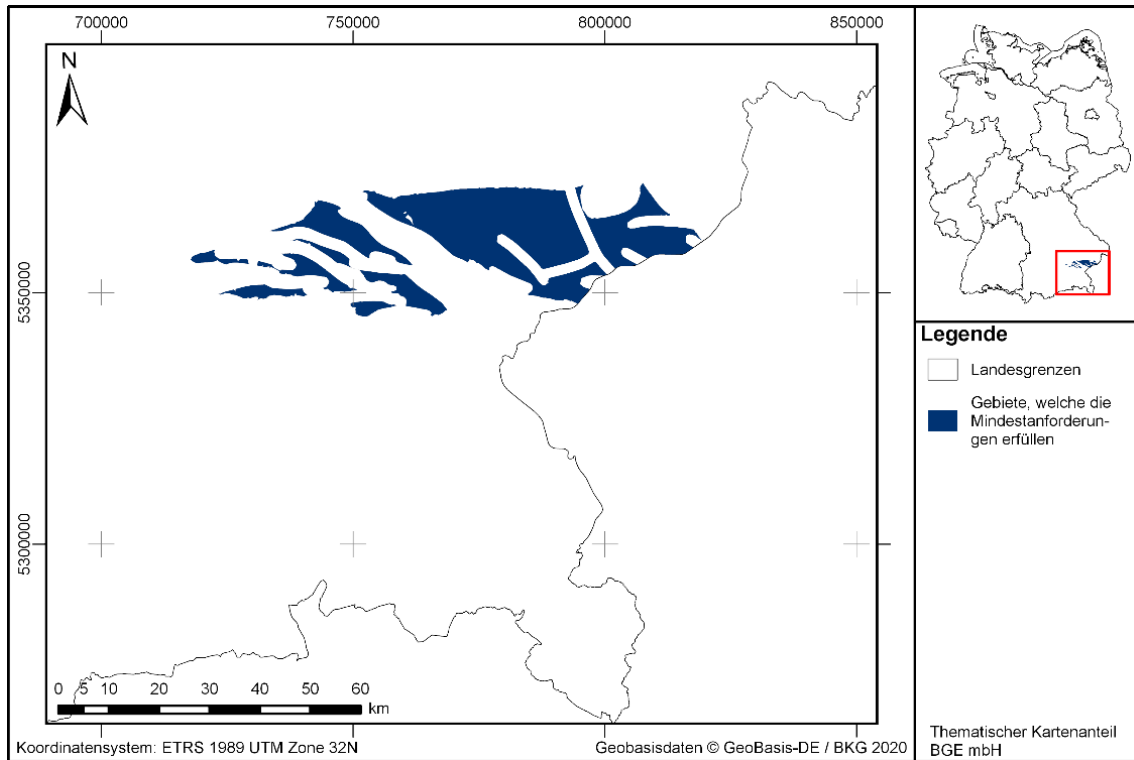


Abbildung 115: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen, ältere Untere Meeresmolasse.

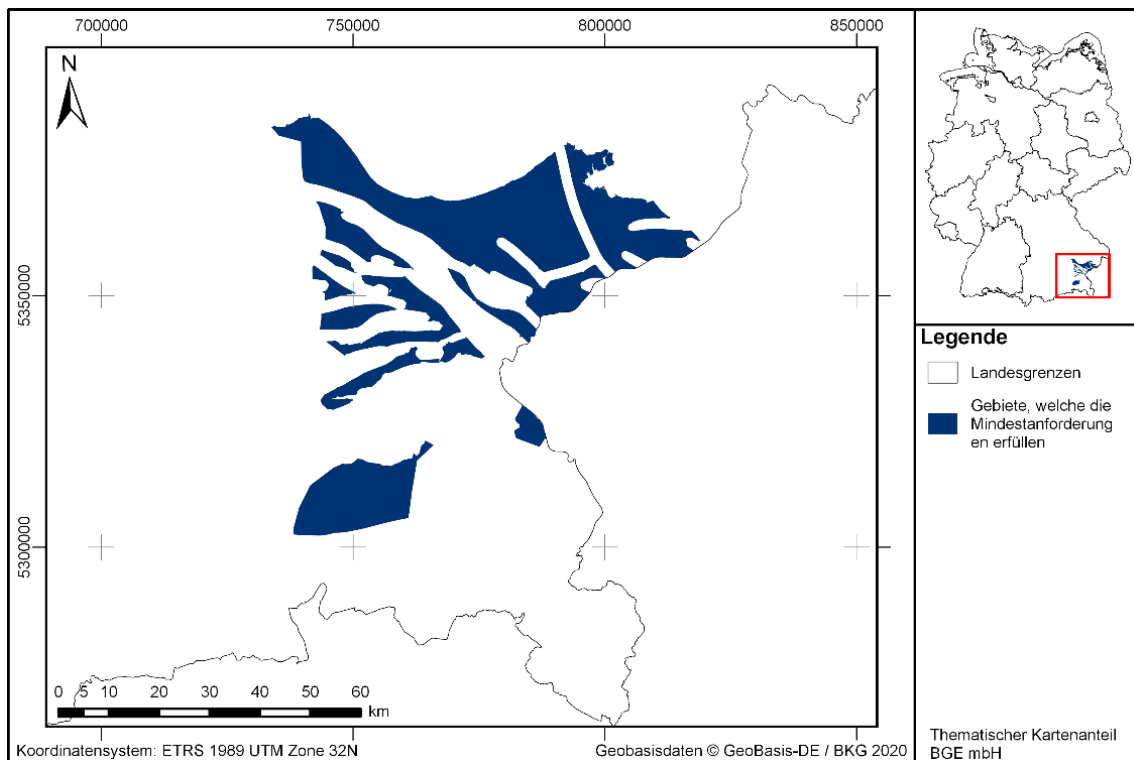


Abbildung 116: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen, jüngere Untere Meeresmolasse

Eine Auflistung dieser die Mindestanforderung erfüllenden Gebiete ist in Tabelle 240 zu finden.

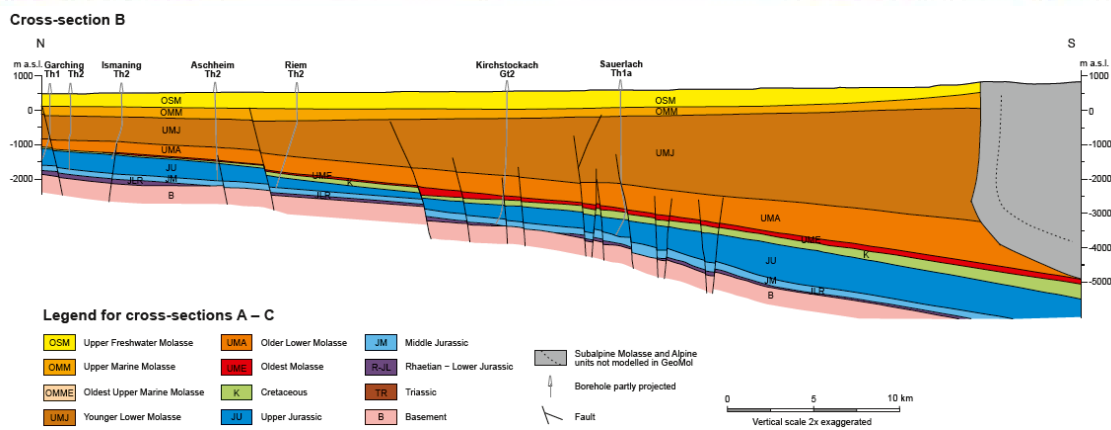


Abbildung 117: Profilschnitt durch das Molassebecken und Übersichtskarte. Die Lage des Profilschnittes B ist in der topographischen Übersicht zu sehen (verändert nach GeoMol Team 2015)

Tabelle 240: *Auflistung aller Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, mit ihrer Fläche*

ID des die Mindestanforderungen erfüllenden Gebietes	Fläche [km ²]
MG_t_tUMMa_BY_1	16
MG_t_tUMMa_BY_2	27
MG_t_tUMMa_BY_3	52
MG_t_tUMMa_BY_4	38
MG_t_tUMMa_BY_5	14
MG_t_tUMMa_BY_6	14
MG_t_tUMMa_BY_7	90
MG_t_tUMMa_BY_8	535
MG_t_tUMMa_BY_9	157
MG_t_tUMMj_BY_1	774
MG_t_tUMMj_BY_2	254
MG_t_tUMMj_BY_3	74
MG_t_tUMMj_BY_4	12
MG_t_tUMMj_BY_5	20
MG_t_tUMMj_BY_6	44
MG_t_tUMMj_BY_7	117
MG_t_tUMMj_BY_8	46
MG_t_tUMMj_BY_9	81
MG_t_tUMMj_BY_10	32
MG_t_tUMMj_BY_11	278

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 241 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die Auflistung aller Bohrungen, die als entscheidungserheblich eingestuft werden, ist im Teil 3 dieser untersetzenden Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete zu finden.

Tabelle 241: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten und deren ID in der BGE-internen Datenbank

DokID	Datei-gruppe	Datei-ID	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11873385	7698	153428	Bohrungen.accdb	Taufkirchen	Gefilterte Bohrungen aus der Bohrdatenbank
11873385	7698	153428	Bohrungen.accdb	Münchsdorf 1 (2.)	Gefilterte Bohrungen aus der Bohrdatenbank
11873385	7698	153428	Bohrungen.accdb	Haarbach, Bonbruck 2	Gefilterte Bohrungen aus der Bohrdatenbank
11873385	7698	153428	Bohrungen.accdb	Erding GT2	Gefilterte Bohrungen aus der Bohrdatenbank
11873385	7698	153428	Bohrungen.accdb	Hofkirchen 2	Gefilterte Bohrungen aus der Bohrdatenbank
11873385	7698	153428	Bohrungen.accdb	Bodenkirchen 1	Gefilterte Bohrungen aus der Bohrdatenbank
11873385	7698	153428	Bohrungen.accdb	Teising 2	Gefilterte Bohrungen aus der Bohrdatenbank
11873385	7698	153428	Bohrungen.accdb	Wurmannsquick	Gefilterte Bohrungen aus der Bohrdatenbank
11877029	9006			3DProjekt_Geo-Mol_FWM	Geologisches 3D-Modell Bayern
11842369/	7862		\Geolog_Karten_Teil1_Erläuterungen\Erl_G K500	Für die jüngere Untere Meeresmolasse: Ost-Grenze ausgewiesen durch die Sandverbreitung aus der Karte 4.4-4 Paläogeographie und Fazies des Oberen Eger (Freudenberger & Schwerd 1996)	Erläuterungen zur Geologischen Karte (Freudenberger & Schwerd 1996)

1.4 Kristallines Wirtsgestein

1.4.1 Baden-Württemberg (BW)

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für das Wirtsgestein Kristallin enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Baden-Württemberg. Die Anwendung der Mindestanforderungen (Mächtigkeit und Tiefenlage) erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Eine tabellarische Übersicht der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten in Baden-Württemberg mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der Inventarisierungstabelle zu finden (BGE 2020l).

Prominente geologische Struktureinheiten in Baden-Württemberg bilden u.a. der Oberrheingraben mit den Grabenschultern des Schwarzwaldes und Odenwaldes, die Schwäbische Alb sowie das Molassebecken (Geyer et al. 2011).

Das Kristallingestein (Paläozoikum) umfasst die ältesten Gesteine Baden-Württembergs und ist Teil der Saxothuringischen und der Moldanubischen Zone des variskischen Orogens. Hierzu zählen neben Metamorphiten (Präkambrium bis Paläozoikum), Magmatite (Paläozoikum), sowie metamorph überprägte sedimentäre Gesteine (jüngstes Paläozoikum) unterschiedlichster Entstehung. Diese Gesteine bilden wie in ganz Mitteleuropa das geologische Fundament („Grundgebirge“), dem die geschichteten Gesteine des Deckgebirges auflagern (Geyer et al. 2011).

Im Zuge der Entwicklung des Oberrheingrabens wurde dieses Grundgebirge an den Grabenschultern angehoben und bildet heute die Kernregionen von Schwarzwald und Odenwald: hierbei handelt es sich um teils schwach, teils hochgradig metamorphe Gesteine, die von magmatischen Gängen und Plutonen durchsetzt sind. Nach Osten setzen sich die kristallinen Gesteine des Grundgebirges unter die Sedimentschichten des Deckgebirges bis in Tiefen von bis zu 3000 m fort (Drong 2003).

In Baden-Württemberg gibt es drei große, „junge“ Vulkangebiete: Das Kirchheim-Urachter Vulkangebiet, die Hegau-Vulkane und das Kaiserstuhl-Massiv im Oberrheingraben. Das im südlichen Oberrheingraben gelegene Vulkangebiet des Kaiserstuhls wurde ins Miozän datiert (15 – 19 Ma). Für das Vulkangebiet des Hegau belegen Datierungen

ebenfalls Eruptionen vom mittleren bis in das späte Miozän (Langhium bis Messinium) über einen Zeitraum von etwa 10 Ma. Das Uracher Vulkangebiet ist das nach Zahl der Eruptionsstellen und Ausdehnung das größte Vulkangebiet Baden-Württembergs. Die K-Ar-Alter von Vulkaniten streuen zwischen 30 – 11 Ma, was als Hinweis auf eine lang andauernde vulkanische Tätigkeit gedeutet wird (Geyer et al. 2011).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 242). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 242: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname
1	UWBWL	BW	11867394/ 7264	ts	Landesmodell
2	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM200

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Tiefenlage und Flächenbedarf des Kristallingesteins in Baden-Württemberg geprüft wurde, ist in Tabelle 243 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 243: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen.*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungsprogramm (SKUA-GOCAD™): Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG25) einladen	
2. DGM zweifach kopieren und um 300 m bzw. um 1500 m absenken	
3. Zuschneiden der Kristallin-Horizonte auf den Teufenbereich > 300 m u. GOK mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	<i>DGM_-300; DGM_-1500</i>
a) Topfläche Kristallin mit abgesenktem DGM (<i>DGM_-300</i>) verschneiden	<i>KristallinBW_DGM-300</i>
b) Gebiete mit Teufen Top Kristallin <300m u. GOK über Push-down Befehl auf 300m u. GOK setzen	<i>KristallinBW_DGM-300</i>
c) Unzureichend kleine Gebiete eliminieren	
4. Zuschneiden der Kristallin-Horizonte auf den Teufenbereich < 1300 m u. GOK mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Erstellung neuer Region (Teufe >1301m u. GOK) innerhalb der Fläche Top Kristallin	
b) Region mit Teufenbereich >1301 m u. GOK löschen	
c) Nochmaliges Filtern auf ausreichenden Flächenbedarf	
5. Anwendung großflächiger finaler AKs (Seismität, Vulkanismus)	
6. Export für ArcGIS	<i>.dxf & .txt files exportieren</i> <i>BW_K_neu.dxf</i> <i>BW_K_neu.txt</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
7. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS	
a) Ermitteln zusammenhängender Polygone und deren Gesamtflächen	<i>BW_IG.shp</i>
b) Abdeckung des 3D-Modells (ohne Filter) als Polygon-Shape	<i>BW_HE_Umriss.shp</i>
c) Überführen der ASCII-Datei in ArcMap	<i>BW_PktGOK_OID.shp</i>
d) Filter der Höhenpunkte auf 300-1300 uGOK	<i>BW_PktGOK_filter.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 244 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell von Baden-Württemberg entstand im Kontext der geowissenschaftlichen Übersichtskartierung, es basiert auf einer lithostratigraphischen Gliederung (Rupf & Nitsch 2008). Im Rahmen der geologischen 3D-Modellierung wurden ältere, teils publizierte Eingangsdaten (Bohrungen etc.) überarbeitet und neu interpretiert. Unterschiede in der Verbreitung, Mächtigkeit und Raumlage einzelner Elemente zu anderen geologischen 3D-Modellen können daher aufgrund verschiedener Bearbeitungszeiträume und Modellierungsmethoden auftreten.

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 244 schrittweise beschrieben.

Für die Bearbeitungsfläche Kristallingestein wurde aus dem 3D-Modell die Topfläche Grundgebirge verwendet.

Das Digitale Geländemodell für Baden-Württemberg wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1300 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die in Teufenbereichen geringer 300 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_-300m absenekt. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unterhalb 1300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht.

In dem Bearbeitungsgebiet sind 3D-gepufferte Störungen des Ausschlusskriteriums Aktive Störungszonen vorhanden. Aus dem Verschnitt der 3D-Störungspuffer mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche werden anschließend in der 2D-Bearbeitung in ArcGIS Pro gelöscht.

2D-Bearbeitung

Das vorgefilterte 3D-Modell von Baden-Württemberg wurde für die Bearbeitung in ArcMap als DXF-Format exportiert. Damit die Daten in den Funktionen und Berechnungen in ArcMap verwendet werden können, müssen sie entsprechend von DXF-Files in Shape-Files überführt werden (Funktion: CAD in Geodatabase). Diese Funktion erzeugt 3 Shapes (Multipatch, Polygon, Polyline). Für die weitere Bearbeitung wird das Polygon-Shape verwendet. Durch die Vorab-Filterung in der 3D-Bearbeitung und die notwendigen Formatübertragungen entstehen „Null-Flächen“, also Polygone, die eine Fläche von „0“ besitzen und somit von ArcMap als fehlerhaft erkannt werden.

Diese Flächen müssen herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Danach werden die Massen von Einzel-Polygonen in jeweils zusammenhängende Flächen verschmolzen (Funktion: Dissolve).

Zusätzlich zu den DXF-Lieferungen wurde eine Gesamtübersicht der Bundesländer übermittelt, in der das jeweilige Maß der 3D-Modell-Abdeckung ersichtlich ist. Aus diesem Shape konnten die Polygone, für die ein Modell vorhanden ist (BW+HE), für die weitere Bearbeitung herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Parallel zur DXF-Datei wurde in der 3D-Bearbeitung eine ASCII-Datei erzeugt, die alle Knotenpunkte mit jeweiliger NN- und u. GOK-Höhe enthält. Aus diesem Datensatz wird ein temporärer Punkt-Layer erzeugt (Funktion: XY-Ereignis-Layer erstellen), indem X- und Y-Spalten aus der Tabelle ausgewählt werden. Um diesen Punkt-Layer in Berechnungen verwenden zu können, muss dieser zuerst in eine neue Feature Class überführt werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Durch den Prozess des Filterns und Zuschneidens anhand der Auswahlkriterien wurden jedoch Randpunkte erzeugt, die außerhalb der Auswahlkriterien liegen.

Um diese rechnerisch entstandenen Elemente zu entfernen, werden von allen Punktdaten jeweils nur die Punkte, die einen Wert unter GOK von 290 – 1310 besitzen (10-m-Puffer), gefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

„In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen; sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann;“

Die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG wird entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, denn im jetzigen Detaillierungsgrad ist eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll.

Begründung aus dem StandAG für diese Verfahrensweise:

„Sofern für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt, soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.“ (§ 23 Abs. 3 StandAG)

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestmächtigkeit des Kristallins in Baden-Württemberg wurde anhand der 3D-Modelle unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Informationen aus der Inventarisierungstabelle für das kristalline Wirtsgestein (BGE 2020I), der GÜK200 und Daten aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungsdaten der Bundesländer wurden zusätzlich herangezogen um die Mindestmächtigkeit der ermittelten Gebiete für das kristalline Wirtsgestein zu verifizieren.

Inklusive des einzurechnenden Sicherheitsabstands von 100 m zum Einlagerungsbereich in kristallinem Wirtsgestein (DBE TEC 2016), der als horizontaler als auch vertikaler Sicherheitsabstand eingehalten werden sollte, wird eine Mindestmächtigkeit von 200 m angesetzt. Diese 200 m Mächtigkeit ergeben sich aus 100 m Sicherheitsabstand im Hangenden und 100 m Mindestmächtigkeit des Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG). Da die maximale Suchteufe nach derzeitigem Stand auf 1500 m u. GOK festgelegt wurde, muss sich die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges im Sinne der Endlagerung von HAW auf einem Höhenniveau von 1300 m u. GOK oder höher befinden.

Von diesem Vorgehen unbeeinflusst bleibt die Möglichkeit innerhalb des kristallinen Gebirgsbereichs, gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, einen homogenen Gesteinskörper des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit (z. B. durch das Vorkommen von magmatischen Ganggesteinen oder Restriktionen durch das vorherrschende Trennflächengefüge) über den Nachweis des sicheren Einschlusses auch über das Zusammenwirken des kristallinen Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren zu führen.

Nur wenige der gelieferten geologischen 3D-Modelle der SGD beinhalten eine detaillierte volumenbezogene geologische 3D-Modellierung der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten mit zusätzlichen Informationen wie z.B. Gesteinstyp, Alter, und tektonische Position. Im Allgemeinen weisen die geologischen 3D-Landesmodelle lediglich, falls vorhanden, eine Topfläche des kristallinen Grundgebirges aus. Da das kristalline Grundgebirge gewöhnlich die älteste liegende geologische Einheit bildet, wird bei der Ausweisung von identifizierten Gebieten des Wirtsgesteins Kristallin nicht mit einem Basishorizont gearbeitet. Nur in einigen wenigen bekannten Fällen liegen hochgradig regionalmetamorphe Gesteine und darin enthaltene Plutonite als tektonische Decken im Hangenden von niedrigmetamorphen Gesteinseinheiten oder Sedimenten. Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr 3)

Die Tiefenlage des Kristallins in Baden-Württemberg wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK (und oberhalb von 1500 m u. GOK) erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für kristallines Wirtsgestein wird ein Flächenbedarf von mindestens 6 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Flächen mit geringerer Ausbreitung, wie bspw. kleinere Intrusionen, werden gelöscht. Die Anwendung der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ erfolgt in ArcMAP in 2D. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen sind Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

„Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.“

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 118 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten aus den 3D-Modellen (SKUA-GOCAD) zu den Mindestanforderungen für das kristalline Wirtsgestein in Baden-Württemberg dargestellt. Die Ausweisung der identifizierten Gebiete ist einem Protokoll zur **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** dargestellt.

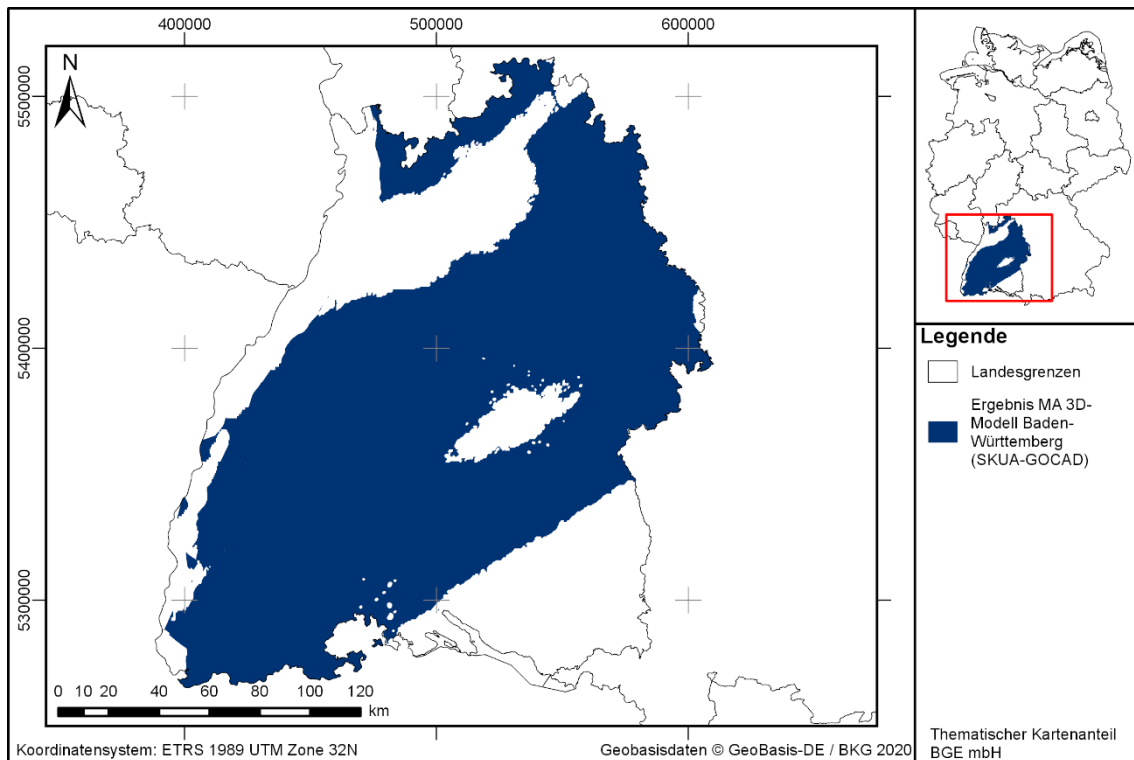


Abbildung 118: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Baden-Württemberg anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 244 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 244: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten

DokID	Dateigruppe	Dateiname	Beschreibung
11867394	7264	\Landesmodell	3D-Modell des Landes Baden-Württemberg

1.4.2 Bayern (BY)

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für das Wirtsgestein Kristallin enthalten kann. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Bayern. Die Anwendung der Mindestanforderungen (Mächtigkeit und Tiefenlage) erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen und GIS-Dateien der Grundgebirgsoberfläche in Bayern.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Die kristallinen Wirtsgesteine in Bayern gehören zu den tektonischen variszischen Großeinheiten des Moldanubikums und Saxothuringikums (Kossmat 1927) und stehen als großflächige Grundgebirgsaufschlüsse im Fichtelgebirge, Oberpfälzer Wald und Bayerischen Wald an. In Teufen von einigen hundert Metern unter mesozoischen Deckgebirgseinheiten ist ein großer Teil von der Donau bis nach Nordbayern von diesen kristallinen Grundgebirgseinheiten unterlagert. Der kristalline Vorspessart in Unterfranken ist Teil der Mitteldeutschen Kristallinzone (MKZ) der Saxothuringischen Zone.

Eine tabellarische Übersicht der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten in Bayern mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der Inventarisierungstabelle (BGE 2020l) zu finden.

Moldanubikum

Der bayerische Anteil des Moldanubikums besteht überwiegend aus hochgradig regionalmetamorphe Gesteinen wie Glimmerschiefern, Gneisen, und sogar Anatexiten (d. h. partiell aufgeschmolzene Metamorphite) sowie aus großvolumigen Granitplutonen aus dem Oberkarbon (Finger et al. 2007).

Das Moldanubikum bildet den hochmetamorphen Kernbereich des variszischen Orogens und ist Teil der Böhmisches Masse, des größten variszischen Grundgebirgsaufschlusses in Mitteleuropa. Die Moldanubische Zone selbst wird unterteilt in das Moldanubikum s. str. (variszische hochgradige Metamorphite, Diatexite, Metatexite und Plutonite) und das Teplá-Barrandium (vorwiegend cadomische Grundgebirgseinheiten und fast ungestörte Abfolgen von altpaläozoische Sedimenten und Vulkaniten im Prager Becken), die durch duktile Scherzonen getrennt sind (Zulauf et al. 2002). Nur ein kleiner Anteil des Teplá-Barrandiums befindet sich auf deutschem Staatsgebiet, im Bereich der duktilen Scherzone am Hohen Bogen. Die metamorphen Gesteine (Granulit-Fazies) in

dieser Zone haben HT-MP Metamorphose bei Temperaturen von größer 750 – 840 °C und Drücke von 10 – 13 kbar erfahren (Bues et al. 1998). Die Peak-Metamorphose-Bedingungen (Granulit-Fazies) der Anatexite (Migmatite) im angrenzenden bayerischen Moldanubikum (s. str.) zeigen ähnliche Temperaturen (800 °C bis 850 °C), jedoch deutlich niedrigere Drücke von 5 – 7 kbar (Kalt et al. 1999).

Sutur Moldanubikum zu Saxothuringikum

Die metamorphen Gesteine nördlich der geologischen Einheit „Zone Erbdorf-Vohenstrauß“ (ZEV), der Erbdorf Linie, werden in Bayern dem Saxothuringikum nach der klassischen Zonengliederung des Variszikums (Kossmat 1927) zugeordnet. Südlich dieser Grenze folgt das Moldanubikum in Bayern (Franke 2000). Dieser tektonische „Grenzbereich“ des kristallinen Grundgebirges war auch Gegenstand des Kontinentalen Tiefbohrprogramms (KTB) bei Windischeschenbach in den 1980er und 1990er Jahren, bei der nach einer kürzeren Vorbohrung (4 km) eine Hauptbohrung auf 9101 m abgeteuft wurde. Mit dieser tiefen Bohrung erhoffte man sich u. a. die Sutur des Moldanubikums zum Saxothuringikum zu durchbohren und das Modell der variszischen Deckentektonik zu verifizieren (Franke 1989). Es zeigte sich, dass die Krustenstruktur in diesem Bereich deutlich komplexer ist und über die volle Länge von 9 km bohrte man in denselben verfalteten, zerscherten und steilstehenden Einheiten aus Paragneisen und Amphiboliten der ZEV (Hirschmann 1996). Die ZEV hat nicht den Charakter einer tektonischen Decke (Franke 1989) wie die nördlicher gelegene Münchberger Gneismasse, sondern repräsentiert eine komplex exhumierte Suturzone (Hirschmann 1996). Die Paragneise und Metamafite der ZEV haben MP-MT-Metamorphose (Amphibolit-Fazies) zwischen 410 Ma und 380 Ma erfahren.

Münchberger Gneismasse

Die Münchberger Gneismasse besteht nicht nur aus Gneisen, sondern auch aus Amphiboliten und Eklogiten. Die verschiedenen Gesteine der Münchberger Gneismasse haben ihre Hauptmetamorphose ebenfalls zwischen 400 Ma und 380 Ma erfahren und liegen nun invers auf metamorphen Gesteinen des Saxothuringikums, die erst bei 340 Ma ihre Peak-Metamorphose-Bedingungen erfahren haben. Die metamorphen Gesteine im Liegenden der Münchberger Gneismasse sind transportierte Tonschiefer und Grauwacken der bayerischen Fazies, die wiederum diskordant auf den Schiefen der Thüringischen Fazies liegen.

Granite in der Böhmisches Masse

Die postkollisionalen variszischen Intrusionen im bayerischen Teil der Böhmisches Masse (Saxothuringikum und Moldanubikum) sind großvolumige peraluminöse S-Typ-Granitplutone und auch I-Typ-Diorite und -Tonalite (Finger et al. 2007; Finger & René 2009; Siebel et al. 2008). Die Granite im bayerischen Teil der Böhmisches Masse haben überwiegend Intrusionsalter zwischen 325 Ma und 310 Ma (Oberkarbon). Es finden sich jedoch auch im Fichtelgebirge, ebenso wie im Erzgebirge und Vogtland, jüngere Intrusionsalter von felsischen Plutoniten und Ganggesteinen, die bis ins Perm reichen (Siebel et al. 2010). Das Fränkische Lineament und mehrere begleitende Störungen begrenzt

im Westen den bayerischen Teil des Saxothuringikums hin zum Fränkischen Becken, das mit permischen und mesozoischen Sedimenten gefüllt ist (Schröder et al. 1997). In Teufen von mehreren Kilometern (2 km bis 10 km) werden in der vermuteten Fortsetzung des Saxothuringikums im Bereich des Fränkischen Beckens ähnliche Granitintrusionen wie im Fichtelgebirge in den regionalmetamorphen Einheiten erwartet. Die deutlichen gravimetrischen und geothermischen Anomalien im Bereich des Fränkischen Beckens könnten dadurch erklärt werden (de Wall et al. 2019).

Spessart

Das Kristallin des Vorspessarts gliedert sich in eine Abfolge aus neun verschiedenen lithologisch-metamorphen Einheiten, wobei es sich v. a. um hochgradig regionalmetamorphe (Amphibolit-Fazies) Gesteine wie Paragneise, Amphibolite, Glimmerschiefer, und Quarzite handelt (Hirschmann & Okrusch 2001; Zeh & Will 2008). In dem Gebiet von Spessart über die Rhön bis in den Thüringer Wald wurden unter jüngerer sedimentärer Überdeckung kristalline Wirtsgesteine der MKZ erbohrt (Hirschmann & Okrusch 2001).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 245). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 245: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11875056/ 7727	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales-Gelände- Modell
3	BY	LfU	11877029/ 9006	ts	3DProjekt_Geo- Mol_FWM	3D-Modell
4	BY	LfU	11877029/ 9010	ts	3DProjekt_Geo- Mol_TGOst	3D-Modell
5	BY	LfU	11877029/ 9014	ts	3DProjekt_Geo- Mol_TGWest	3D-Modell
6	BY	LfU	11877029/ 9029	ts	3DProjekt_HL_Re- gion_13	3D-Modell

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Beschreibung
7	BY	LfU	11842369_01/2886	.mxd mit geo- data- base	\Oberkante_Grund- gebirge	GIS-Dateien

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Kristallin in Bayern geprüft wurde, ist in Tabelle 246 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 246: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™); : Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1300 m (DGM_-1300m) absenken	<i>BY_DGM_2--_-300m.ts;</i> <i>BY_DGM_200_-1300m.ts</i>
b) Angleichen der sich überlappenden Grundgebirgsflächen der einzelnen Modelle	
c) Bearbeitungsfläche erzeugen: aus allen Grundgebirgsflächen eine Fläche erstellen	<i>BY_K_merged.ts</i>
d) Zuschneiden der Bearbeitungsfläche auf die Landesgrenze Bayerns	<i>BY_K_cutborders.ts</i>
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1300 m u. GOK liegen, ausschneiden und löschen	<i>BY_K_1300m.ts</i>
f) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, auf -300 m u. GOK herabsenken	<i>BY_K_1300_300.ts</i>
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	<i>BY_K_1300_300_qs.ts</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
h) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Export der Kurven zur Weiterbearbeitung in 2D	
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	<i>MG_K_BY.dxf</i>
2. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS	
a) Überführen der DXF-Datei in ArcMap	
b) Ermitteln zusammenhängender Polygone und deren Gesamtflächen	<i>BY_IG.shp</i>
c) Abdeckung des 3D-Modells (ohne Filter) als Polygon-Shape	<i>BY_UmrissClip.shp</i>
d) Überführen der ASCII-Datei in ArcMap	<i>BY_PktGOK_OID.shp</i>
e) Filter der Höhenpunkte auf 300-1300 uGOK	<i>BY_PktGOK_filter.shp</i>
f) Vorbereitung der Konturlinien	<i>KonturlinienNN_UTM.shp</i>
g) Punkte entlang der Konturlinien erzeugen (Abstand 200m)	<i>BayernKonturlinienNN_Points.shp</i>
h) GOK-Höhen der Punkte berechnen	
i) Geländemodelle erzeugen (GOK)	<i>gok_NatNachb</i> <i>gok_nana_100</i>
j) Abdeckung des Höhenmodells	<i>BY_Umring_ohneAnstehend</i>
k) Raster zu Polygon	<i>Bayern_IG_Konturlinien.shp</i>
l) Filter 0-300 uGOK + 300-1300 uGOK	<i>Bayern_IG</i>
m) Priorisieren doppelter Abdeckung	<i>Bayern_IG_Erase</i>
n) Höhenpunkte aus Bayern-Karte	<i>Bayern_TIN</i> <i>Bayern_TIN_Knoten.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 246 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Die Bearbeitungsfläche wurden aus Grundgebirgsflächen von vier verschiedenen Modellen zusammengesetzt. Als die Fläche, an die bei Überlappungen die Grundgebirgsflächen der anderen Modelle angepasst wurden, wurde die Grundgebirgsfläche des Modells „GeoMol FWM“ verwendet. Das Modell wurde deshalb gewählt, weil es im Vergleich zu den anderen Modellen die größte flächenmäßige Ausdehnung hat und die restlichen Modelle an dessen Rändern ergänzend wirken.

Das Modell „GeoMol FWM“ wurde im Zuge eines grenzüberschreitendes EU-Projektes (GeoMol) erstellt und beinhaltet 9 stratigraphische Einheiten (von Top Grundgebirge bis Basis Obere Meeresmolasse) sowie eine Topographiefäche. Das Modell betrachtet den Bereich des bayerischen Molassebeckens bis etwa dem Beginn der Fränkischen Alb. Folgende Flächen wurden modelliert; ob als Basis- oder Topfläche ist dem Präfix B_ bzw T_ zu entnehmen:

- B_Q = Basis Quartär
- B_OSM = Basis Ob. Süßwassermolasse
- B_OMM = Basis Ob. Meeresmolasse
- B_OMME = Basis Ältere Ob. Meeresmolasse
- B_UMJ = Basis Jüngere Unt. Meeresmolasse
- B_UMA = Basis Ältere Unt. Meeresmolasse
- B_T = Basis Tertiär
- T_JU = Top Ob. Jura
- T_JM = Top Mittlerer Jura
- T_RJL = Top Rhaetium–Unterjura
- T_Tr = Top Trias
- T_B = Top Grundgebirge (Basement)

Ergänzend wurden folgende Modelle verwendet:

Das Modell GeoMol TG West wurde ebenfalls im Rahmen des EU-Projektes GeoMol erstellt und beinhaltet 11 Tophorizonte (mit dem Präfix OK) und 10 Basishorizonte (mit dem Präfix UK). Das Modell betrachtet den westlichen Teil des bayerischen Molassebeckens. Folgende Flächen wurden modelliert oder sind als Marker vorhanden:

- UK_unit_q = Basis Quartär (nur Marker)
- UK_unit_obm1 = Basis Ob. Brackische Molasse
- UK_unit_osma = Basis Ob. Süßwassermolasse
- UK_unit_ommj = Basis Jüngere Ob. Meeresmolasse
- UK_unit_omma = Basis Ältere Ob. Meeresmolasse
- UK_unit_umj = Basis Unt. Jüngere Molasse
- UK_unit_tbss = ?
- OK_unit_mo = Meeresmolasse (?)
- OK_unit_m = ? (nur Marker)
- UK_unit_aam = ? (nur Marker)
- UK_unit_mm = Meeresmolasse (?)
- UK_unit_uma = Basis Unt. Ältere Molasse

- OK_unit_jo = Top Oberer Jura (nur Marker)
- OK_unit_joa = Top Oberer Jura
- OK_unit_jm = Top Mittlerer Jura
- OK_unit_ju = Top Unterer Jura
- OK_unit_k = Kreide (nur Marker)
- OK_unit_km = Top Kreide (?)
- OK_unit_kr = Kreide (nur Marker)
- OK_unit_ku = Top Unterkreide
- OK_unit_gg = Top Grundgebirge

Das Modell GeoMol TG Ost wurde ebenfalls im Rahmen des EU-Projektes GeoMol erstellt und beinhaltet 4 Tophorizonte (mit dem Präfix OK) und 10 Basishorizonte (mit dem Präfix UK). Das Modell betrachtet den östlichen Teil des bayerischen Molassebeckens. Folgende Flächen wurden modelliert oder sind als Marker vorhanden:

- UK_unit_q = Basis Quartär (nur Marker)
- UK_unit_q_unsicher = Basis Quartär (nur Marker)
- UK_unit_osmj = Basis Ob. Süßwassermolasse
- UK_unit_osmj_unsicher = Basis Ob. Süßwassermolasse (nur Marker)
- UK_unit_osmm2 = Basis Ob. Süßwassermolasse
- UK_unit_osmm2_unsicher = Basis Ob. Süßwassermolasse
- UK_unit_osmm1 = Basis Ob. Süßwassermolasse
- UK_unit_osmm1_unsicher = Basis Ob. Süßwassermolasse (nur Marker)
- UK_unit_osma = Basis Ob. Süßwassermolasse
- UK_unit_osma_unsicher = Basis Ob. Süßwassermolasse (nur Marker)
- UK_unit_obm = Basis Ob. Brackische Molasse
- UK_unit_obm1 = Basis Ob. Brackische Molasse
- UK_unit_obm1_unsicher = Basis Ob. Brackische Molasse (nur Marker)
- UK_unit_ommj = Basis Jüngere Ob. Meeresmolasse
- UK_unit_ommj_unsicher = Basis Jüngere Ob. Meeresmolasse (nur Marker)
- UK_unit_omma = Basis Ob. Meeresmolasse
- UK_unit_omma_unsicher = Basis Ob. Meeresmolasse (nur Marker)
- UK_unit_omme = Basis Älteste Ob. Meeresmolasse
- UK_unit_omme_unsicher = Basis Älteste Ob. Meeresmolasse (nur Marker)
- UK_unit_umj = Basis Jüngere Unt. Meeresmolasse
- UK_unit_umj_unsicher = Basis Jüngere Unt. Meeresmolasse (nur Marker)
- UK_unit_uma = Basis Ältere Unt. Meeresmolasse
- UK_unit_uma_unsicher = Basis Ältere Unt. Meeresmolasse (nur Marker)
- UK_unit_tertiaer = Basis Tertiär
- OK_unit_jo = Top Oberer Jura
- OK_unit_jm = Top Mittlerer Jura
- OK_unit_gg = Top Grundgebirge

Das Modell-Region 13 wurde im Rahmen der hydrogeologischen Landesaufnahme für die Planungsregion Landshut erstellt und beinhaltet 9 Tophorizonte (mit dem Zusatz OK)

und 5 Basishorizonte (mit dem Zusatz UK). Das Modell betrachtet die Region um Landshut. Folgende Flächen wurden modelliert oder sind als Marker vorhanden:

- surf_uk_q = Basis Quartär
- surf_uk_OSMj = Basis Jüngere Ob. Süßwassermolasse
- surf_uk_miSV = Basis nördl. Vollsotter der OSM (Miozän)
- surf_uk_miNV = Basis südl. Vollsotter der OSM (Miozän)
- surf_uk_miSFmiUF = Glaukonitsande mit Blättermergeln (?) (OSMA2)
- surf_ok_miN = Top Neuhofener Schichten
- surf_ok_ol = Top Oligozän
- surf_ok_eo = Top Eozän
- surf_ok_miGB = Top Jüngere Ob. Meeresmolasse
- surf_ok_kr = Top Kreide
- surf_ok_w = Top Malm
- surf_OK_malm_gestoert_neu
- surf_ok_GG = Top Grundgebirge surf_OK_grundgebirge_gestoert_neu

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 246 schrittweise beschrieben.

Als Basisflächen für die Bearbeitungsfläche dienten folgende Flächen, die jeweils das Top des Grundgebirges darstellen:

- „T_B“ aus dem Modell „GeoMol FWM“
- „OK_unit_gg“ aus dem Modell „GeoMol TG West“
- „OK_unit_gg“ aus dem Modell „GeoMol TG Ost“
- „surf_ok_GG“ aus dem Modell „Region 13“

Das Digitale Geländemodell für Bayern wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1300 m in die Tiefe versetzt.

Die Grundgebirgsflächen der einzelnen Modelle wurden zu einem Bearbeitungshorizont zusammengefügt, wobei die Flächen aus den Modellen „GeoMol TG West“, „GeoMol TG Ost“ und „Region 13“ der Fläche aus dem Modell „GeoMol FWM“ angeglichen wurden. Der Bearbeitungshorizont wurde dann auf die Landesgrenzen Bayerns zugeschnitten, die Gebiete außerhalb Bayerns entfernt.

Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden mithilfe des digitalen Geländemodells auf 300 m u. GOK beschnitten.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1300 m u. GOK) eingehalten werden.

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen mit Sicherheitsabständen. Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche

wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche wurden im DXF-Format für die länderübergreifende Weiterbearbeitung exportiert.

2D-Bearbeitung

Das vorgefilterte 3D-Modell und dessen gesamter Abdeckungsbereich wurden für die Bearbeitung in ArcMap als DXF-Format exportiert (siehe Arbeitsschritte in Tabelle 246). Damit die Daten in den Funktionen und Berechnungen in ArcMap verwendet werden können, müssen sie entsprechend von DXF-Files in Shape-Files überführt werden (Funktion: CAD in Geodatabase).

Diese Funktion erzeugt für das gefilterte 3D-Modell 3 Shapes (Multipatch, Polygon, Polyline). Für die weitere Bearbeitung wird das Polygon-Shape verwendet. Durch die Vorab-Filterung in der 3D-Bearbeitung und die notwendigen Formatübertragungen entstehen „Null-Flächen“, also Polygone, die eine Fläche von „0“ besitzen und somit von ArcMap als fehlerhaft erkannt werden.

Diese Flächen müssen herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Danach werden die Massen von Einzel-Polygonen in jeweils zusammenhängende Flächen verschmolzen (Funktion: Dissolve).

Das DXF des Umrisses beinhaltet Polylinien. Da für ein flächenbasiertes Ausschneiden Polygon-Shapes nötig sind, muss der Datensatz zuerst in Polygone umgeformt werden (Funktionen: Feature-Class in Feature-Class + Feature in Polygon). Bei dem Umriss ist zu beachten, dass die Modellabdeckung über die Grenze von Deutschland hinausgeht und das Umrisspolygon demnach vor der Weiterverarbeitung ausgeschnitten werden muss (Funktion: Ausschneiden).

Parallel zur DXF-Datei wurde in der 3D-Bearbeitung eine ASCII-Datei erzeugt, die alle Knotenpunkte mit jeweiliger NN- und u. GOK-Höhe enthält. Aus diesem Datensatz wird ein temporärer Punkt-Layer erzeugt (Funktion: XY-Ereignis-Layer erstellen), indem X- und Y-Spalten aus der Tabelle ausgewählt werden. Um den Punkt-Layer in Berechnungen verwenden zu können, muss dieser zuerst in eine neue Feature Class überführt werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Durch den Prozess des Filterns und Zuschneidens anhand der Auswahlkriterien wurden jedoch Randpunkte erzeugt, die außerhalb der Auswahlkriterien liegen.

Um diese rechnerisch entstandenen Elemente zu entfernen, werden von allen Punktdaten jeweils nur die Punkte, die einen Wert unter GOK von 290 – 1310 besitzen (10 m Puffer), gefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Das 3D-Modell deckt nicht die gesamte Fläche von Bayern ab. Somit müssen die restlichen Gebiete mit anderen Datenquellen gefüllt werden. Hierfür wurde ein Datensatz zur Verfügung gestellt, der zum einen aus einem Polygon-Shape des Anstehenden Kristallin und zum anderen aus 4 verschiedenen Linien-Shapes (Konturlinien in NN) besteht.

Die Konturlinien werden mittels „Merge“ zusammengeführt und von DHDN_3_Degree_Gauss_Zone_4 in ETRS_1989_UTM_Zone_32N projiziert. Die Umrechnung von NN-Höhen zu GOK-Höhen kann nur mit Punkten erfolgen. Dafür werden entlang der Konturlinien automatisiert Punkte erzeugt. Da das DGM (Datenquelle für die NN-Geländehöhen) eine Pixelgröße von 200 m hat, wird ein Punktabstand von 200 m bestimmt.

Die erzeugten Punkte beinhalten bereits die NN-Höhe der Schicht an der jeweiligen Koordinate. Um den Höhenwert in Bezug auf die Geländeoberkante auszurechnen, wird mit der Funktion „Oberflächeninformationen hinzufügen“ allen Punkten ein neues Feld mit der Höhe des Pixels (DGM200) an der entsprechenden Koordinate hinzugefügt. Mit der NN-Geländehöhe und der NN-Schichthöhe kann im nächsten Schritt die GOK-Höhe in einem neuen Feld berechnet werden (-NNSchicht - NNgelaende).

Die Verteilung der Höhenpunkte verläuft noch immer entlang der NN-Schicht-Konturlinien aus der Datengrundlage. Eine Abbildung der Schicht als Ganzes ist somit nur mittels Interpolation möglich. Unter Beachtung der stark unregelmäßigen Punktverteilung mit teilweise sehr großen Abständen zueinander, kommt nur eine lineare Interpolationsmethode in Frage.

Die Interpolationsmethode „Natürlicher Nachbar“ liefert stabile, einheitliche Ergebnisse. Hierbei wird eine Raster-Oberfläche anhand von Punkten mithilfe einer Natural Neighbor-Methode berechnet. Der Z-Wert ergibt sich aus der zuvor berechneten GOK-Höhe. Mit dieser Methodik entsteht eine Zellengröße von 1285,5982744.

Dies ist ein berechneter Mittelwert, an dem die Genauigkeit besser ersichtlich wird. Mit dem Hintergrund, dass die Punkte an den Konturlinien nur 200 m voneinander entfernt liegen, ist eine entsprechend große Menge an deutlich größeren Abständen als 1300 m nötig um diese Zellengröße zu erhalten. Die so interpolierten Höhen und daraus weiter ermittelten Gebiete müssen entsprechend mit Vorsicht und unter der Beachtung einer Ungenauigkeit von mehreren Kilometern betrachtet werden.

Die Pixelgröße kann manuell eingestellt und somit deutlich kleiner berechnet werden, als der vorgeschlagene errechnete Mittelwert. Dies führt dazu, dass das Ergebnis-Raster weniger „verpixelt“ aussieht und auch eine Überführung in Polygone vereinfacht ist. Dieser Prozess steigert jedoch **nicht** die tatsächliche Genauigkeit. Im Hinblick auf die weitere Bearbeitung wird die Pixelgröße auf 100 m gesetzt.

Die übermittelten Konturlinien decken nur den Bereich ohne Anstehendes Kristallin ab (dafür wurde das separate Polygon-Shape geliefert). Somit muss die Fläche der tatsächlichen Abdeckung ermittelt werden. Hierfür wird zuerst das Polygon von Bayern aus dem VG250_LAN Datensatz herausgefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class) und daraufhin aus dieser Fläche die Polygone des Anstehenden Kristallin ausgeschnitten (Funktion: Radieren).

Der nächste Bearbeitungsschritt beinhaltet die Berechnung von Polygonen in 3 Höhenintervallen: 0 – 300 u. GOK, 300 – 1300 u. GOK und größer als 1300 u. GOK. Die Funktion „Raster in Polygon“ erkennt Pixel mit identischen Werten und bildet daraus ein Polygon-Shape. Die vorab definierten Intervalle müssen somit vorab mittels „Reklassifizieren“ festgelegt werden. Als maximale Ausdehnung dient das erzeugte Polygon der Modellabdeckung. Daraufhin wird die nicht relevante 3. Kategorie (> 1300 u. GOK) herausgefiltert (Funktion: Feature-Class to Feature-Class) und das Gebiet, das bereits durch ein 3D-Modell mit höherer Genauigkeit abgedeckt ist aus dem Ergebnispolygon ausgeschnitten (Funktion: Radieren).

Um nun für die Gebiete außerhalb des 3D-Modells ebenfalls Höhenpunkte zu erhalten, wird aus dem erzeugten Geländemodell (Pixelgröße 100) ein TIN berechnet (Funktion: Raster in TIN). Dessen Ausdehnung ist innerhalb der Funktion auf die Fläche der relevanten Gebiete (zuvor erzeugte Polygone + Kristallin Anstehend) festgelegt. Aus diesem TIN können daraufhin alle Knotenpunkte extrahiert werden (Funktion: TIN-Knoten).

Für die weiteren Berechnungen wird die Z-Information der Knotenpunkte ausgelesen, die bereits im Hintergrund als Attribut hinterlegt ist (Funktion: Z-Informationen hinzufügen). Zusätzlich wird ein neues Feld hinzugefügt (u. GOK), welches mittels einer einfachen Formulierung $[Z]*(-1)$ berechnet wird, da alle Z-Werte ein Minus als Vorzeichen haben (da sie unter der Geländeoberfläche liegen).

Die vorbereiteten relevanten Gebiete setzen sich schlussendlich aus den Polygonen des 3D-Modells, dem Ergebnis der Höhenmodellberechnung und dem separaten Layer der Gebiete des Anstehenden Kristallin zusammen. Die Höhenpunkte ergeben sich aus der ASCII-Datei des 3D-Modells und den ausgelesenen Knotenpunkten des TIN.

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 StandAG Abs. 5

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

„In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen; sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann;“

Die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG wird entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, denn im jetzigen Detaillierungsgrad ist eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll.

Begründung aus dem StandAG für diese Verfahrensweise:

„Sofern für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt,

soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.“ (§ 23 Abs. 3 StandAG)

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestmächtigkeit des Kristallins in Bayern wurde anhand der 3D-Modelle unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Informationen aus der Inventarisierungstabelle für das kristalline Wirtsgestein (BGE 2020I), der GÜK200 und Daten aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungsdaten der Bundesländer wurden zusätzlich herangezogen um die Mindestmächtigkeit der ermittelten Gebiete für das kristalline Wirtsgestein zu verifizieren.

Inklusive des einzurechnenden Sicherheitsabstands von 100 m zum Einlagerungsbereich in kristallinem Wirtsgestein (DBE TEC 2016), der als horizontaler als auch vertikaler Sicherheitsabstand eingehalten werden sollte, wird eine Mindestmächtigkeit von 200 m angesetzt. Diese 200 m Mächtigkeit ergeben sich aus 100 m Sicherheitsabstand im Hangenden und 100 m Mindestmächtigkeit des Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG). Da die maximale Suchteufe nach derzeitigem Stand auf 1500 m u. GOK festgelegt wurde, muss sich die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges im Sinne der Endlagerung von HAW auf einem Höhenniveau von 1300 m u. GOK oder höher befinden.

Von diesem Vorgehen unbeeinflusst bleibt die Möglichkeit innerhalb des kristallinen Gebirgsbereichs, gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG einen homogenen Gesteinskörper des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit (z. B. durch das Vorkommen von magmatischen Ganggesteinen oder Restriktionen durch das vorherrschende Trennflächengefüge) über den Nachweis des sicheren Einschlusses auch über das Zusammenwirken des kristallinen Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren zu führen.

Nur wenige der gelieferten geologischen 3D-Modelle der SGD beinhalten eine detaillierte volumenbezogene geologische 3D-Modellierung der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten mit zusätzlichen Informationen wie z. B. Gesteinstyp, Alter, und tektonische Position. Im Allgemeinen weisen die geologischen 3D-Landesmodelle lediglich, falls vorhanden, eine Topfläche des kristallinen Grundgebirges aus. Da das kristalline Grundgebirge gewöhnlich die älteste liegende geologische Einheit bildet, wird bei der Ausweisung von identifizierten Gebieten des Wirtsgesteins Kristallin nicht mit einem Basishorizont gearbeitet. Nur in einigen wenigen bekannten Fällen liegen hochgradig regionalmetamorphe Gesteine und darin enthaltene Plutonite als tektonische Decken im Hangenden von niedrigmetamorphen Gesteinseinheiten oder Sedimenten.

Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr 3)

Die Tiefenlage des Kristallins in Bayern wurde anhand des 3D-Modells und der gelieferten Grundgebirgsoberfläche unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft.

Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für kristallines Wirtsgestein wird ein Flächenbedarf von mindestens 6 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Flächen mit geringerer Ausbreitung, wie bspw. kleinere Intrusionen, werden gelöscht. Die Anwendung der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ erfolgt in ArcMAP in 2D. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen sind Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

„Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.“

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 119 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten aus den 3D-Modellen (SKUA-GOCAD) zu den Mindestanforderungen für das kristalline Wirtsgestein in Bayern dargestellt. Der nördliche Teil Bayerns wird durch das GIS-Projekt der Grundgebirgsoberfläche Bayerns abgedeckt. Die Ausweisung der identifizierten Gebiete ist einem Protokoll zur **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** dargestellt.

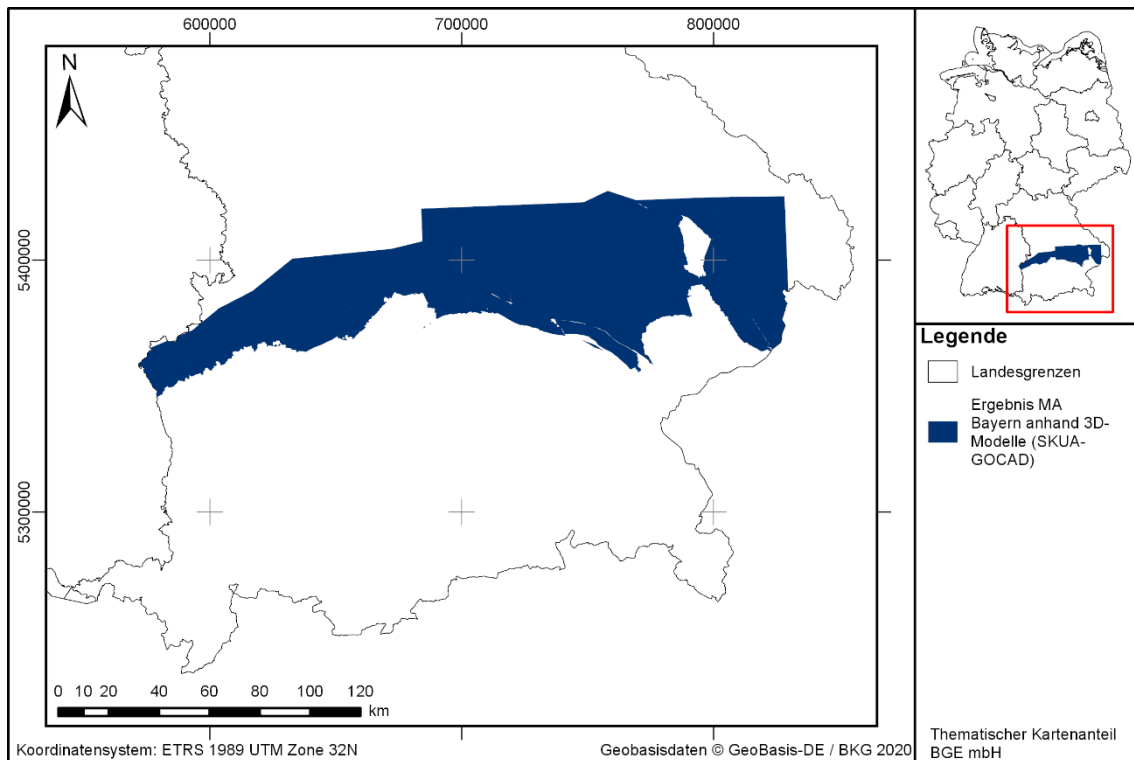


Abbildung 119: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Bayern anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 247 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 247: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten

DokID	Dateigruppe	Dateiname	Beschreibung
11877029	9006	3DProjekt_GeoMol_FWM	3D-Modell
11877029	9010	3DProjekt_GeoMol_TGOst	3D-Modell
11877029	9014	3DProjekt_GeoMol_TGWest	3D-Modell
11877029	9029	3DProjekt_HL_Region_13	3D-Modell
11842369_01	2886	\Oberkante_Grundgebirge	GIS-Projekt der Grundgebirgsoberfläche Bayerns

1.4.3 Hessen (HE)

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für das Kristallingestein. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Bundesland Hessen. Die Anwendung der Mindestanforderungen (Mächtigkeit und Tiefenlage) erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument beschrieben wird (BGE 2020k).

Geologischer Überblick

Eine tabellarische Übersicht der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten in Hessen mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der Inventarisierungstabelle zu finden (BGE 2020l).

Kristallines Wirtsgestein, in Form von Plutoniten und amphibolitfaziellen Metamorphiten, steht in Hessen oberflächlich nur im Odenwald und Spessart an. Diese Mittelgebirgseinheiten im Süden Hessens gehören zur Mitteldeutschen Kristallzone (MKZ) des Saxothuringikums (Zeh & Will 2008). Das variszische Grundgebirge im Westen von Hessen gehört zum Rheinischen Schiefergebirge des Rhenoherynikums und wird v. a. von verfalteten Einheiten aus Tonschiefern, Phylliten, Sandsteinen und Vulkaniten aus dem Devon und Karbon aufgebaut. Die niedrigmetamorphen Einheiten (Phyllite und Schiefer) des Vordertaunus gehören zur Nördlichen Phyllitzone.

Das Kristallin des Odenwalds ist der größte Aufschluss von kristallinen Wirtsgesteinen in der MKZ und wird in zwei große Einheiten gegliedert, die durch eine tektonische Scherzone getrennt sind, dem Böllsteiner Odenwald und dem Bergsträsser Odenwald (Stein 2001; Zeh & Will 2008). Der Böllsteiner Odenwald im Osten besteht aus granitischen bis granodioritischen Orthogneisen (mit eingeschalteten Amphiboliten), die von Glimmerschiefern und Paragneisen umgeben sind (Zeh & Will 2008). Der Bergsträsser Odenwald im Westen besteht überwiegend aus plutonischen Gesteinen und wird in drei magmatische Komplexe gegliedert, (i) den Frankenstein-Komplex aus Gabbros und Dioriten, (ii) den Neunkirchen Magmatit-Abfolge (umfasst Flasergranite, Gabbros und Diorite) und (iii) den Intrusivkomplex von Weschnitz-Heidelberg-Tromm, der aus Graniten und Granodioriten besteht (Zeh & Will 2008). Die unterschiedlichen magmatischen Gesteine intrudierten in Amphibolite und Paragneise.

Das Kristallin des Spessarts gliedert sich in eine Abfolge aus neun verschiedenen lithologisch-metamorphen Einheiten; das sind v. a. regionalmetamorphe Gesteine wie Paragneise, Amphibolite, Glimmerschiefer, und Quarzite (Hirschmann & Okrusch 2001; Zeh

& Will 2008). Die Metamorphite des Spessarts haben amphibolitfazielle Metamorphose in der variszischen Orogenese erfahren. In Richtung Norden sind die kristallinen Wirtsgesteine des Spessarts in Hessen von Rotliegend-Sedimenten überdeckt (Zeh & Will 2008). In dem Gebiet von Spessart über die Rhön bis in den Thüringer Wald wurden in Hessen unter jüngerer sedimentärer Überdeckung kristalline Wirtsgesteine der MKZ erbohrt (Hirschmann & Okrusch 2001).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 248). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 248: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname
1	HE	HLNUG	11887793/ 9111	ts	Landesmodell
2	HE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM200
3	HE	HLNUG	11841938_02/ 7518	pdf	Abschlussbericht Hessen 3D

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Tiefenlage und Flächenbedarf des kristallinen Wirtsgesteins in Hessen geprüft wurde, ist in Tabelle 249 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 249: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™); Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG25) einladen	
2. DGM zweifach kopieren und um 300 m bzw. um 1500 m absenken	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
3. Zuschneiden der Kristallin-Horizonte auf den Teufenbereich > 300 m u. GOK mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	<i>DGM_-300; DGM_-1500</i>
a) Topfläche Kristallin mit abgesenktem DGM (<i>DGM_-300</i>) verschneiden	<i>KristallinHE_DGM-300</i>
b) Gebiete mit Teufen Top Kristallin <300m u. GOK über Push-down Befehl auf 300m u. GOK setzen	<i>KristallinHE_DGM-300</i>
c) Unzureichend kleine Gebiete eliminieren	
4. Zuschneiden der Kristallin-Horizonte auf den Teufenbereich < 1300 m u. GOK mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	<i>KristallinHE_300-1300</i>
a) Erstellung neuer Region (Teufe >1301m u. GOK) innerhalb der Fläche Top Kristallin	
b) Region mit Teufenbereich >1301 m u. GOK löschen	
c) Nochmaliges Filtern auf ausreichenden Flächenbedarf	
5. Anwendung großflächiger finaler AKs (Seisizität, Vulkanismus)	
6. Export für ArcGIS Desktop	<i>.dxf & .txt files exportieren</i> <i>HE_K.dxf</i> <i>HE_K.txt</i>
7. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Desktop	
a) Überführen der DXF-Datei in ArcMap	
b) Ermitteln zusammenhängender Poly-gone und deren Gesamtflächen	<i>HE_IG.shp</i>
c) Abdeckung des 3D-Modells (ohne Filter) als Polygon-Shape	<i>BW_HE_Umriss.shp</i>
d) Überführen der ASCII-Datei in ArcMap	<i>HE_PktGOK_OID.shp</i>
e) Filter der Höhenpunkte auf 300-1300 uGOK	<i>HE_PktGOK_filter.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 249 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete geologische 3D-Modell ist das Hessen-3D-Modell des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLUNG). Es ist aus der Projektarbeit „3D-Modell der geothermischen Tiefenpotentiale von Hessen“ der Technischen Universität Darmstadt entstanden (Arndt & Bär 2011). Es wird die komplette Fläche des hessischen Bundeslandes abgebildet und beinhaltet Isothermen (60 °C, 100 °C, 120 °C und 150 °C), Störungsflächen (s_geologie_Stoerungen) sowie insgesamt 6 Topflächen von folgenden stratigraphischen Einheiten:

- s_geologie_QuartaerTertiaer = Quartär und/oder Tertiär
- s_geologie_MuschelkalkKeuper = Muschelkalk und/oder Keuper
- s_geologie_Buntsandstein = Bundsandstein
- s_geologie_Zechstein = Zechstein
- s_geologie_Rotliegend = Rotliegend
- s_geologie_PraePerm = Alle Gesteine älter als Perm

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 249 schrittweise beschrieben.

- Für die Bearbeitungsfläche Kristallingestein wurde aus dem 3D-Modell die Topfläche s_geologie_PraePerm (= Alle Gesteine älter als Perm) verwendet.

Das Digitale Geländemodell (DGM) für Hessen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie in 300 m und 1300 m Teufe u. GOK versetzt (*Compute_On Object: z.B. Z = Z+300;*). Es resultieren die DGM Flächen *DGM-300* und *DGM-1300*.

Das auf 300 m Teufe gesetzte DGM *DGM-300* wurde mit der vorhandenen 3D-Kristallinfläche aus dem Ländermodell verschnitten. Regionen mit Top Kristallin oberhalb 300 m Teufe wurden auf 300 m u. GOK heruntergesetzt.

Im Anschluss wurde die Fläche Top Kristallin auch mit dem auf 1300 m Teufe verschobenen DGM *DGM-1300* verschnitten. Tiefer liegendes Kristallingestein hat keine Relevanz für die Endlagersuche und wird über die Erstellung einer Region (Teufe >1301 m u. GOK) aus dem Modell eliminiert. Es resultiert der Horizont *KristallinHE_300-1300*.

Die Bearbeitungsfläche Kristallingestein wurde anschließend im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII-Datei an STA-ST.2 zur weiteren Anwendung der Mindestanforderungen übergeben.

2D-Bearbeitung

Bearbeitung und angewandte Funktionen in ArcMAP

Das vorgefilterte 3D-Modell von Hessen wurde für die Bearbeitung in ArcMap als DXF-Format exportiert (siehe Arbeitsschritte in Tabelle 249). Damit die Daten in den Funktionen und Berechnungen in ArcMap verwendet werden können, müssen sie entsprechend von DXF-Files in Shape-Files überführt werden (Funktion: CAD in Geodatabase). Diese Funktion erzeugt 3 Shapes (Multipatch, Polygon, Polyline). Für die weitere Bearbeitung wird das Polygon-Shape verwendet.

Durch die Vorab-Filterung in der 3D-Bearbeitung und die notwendigen Formatübertragungen entstehen „Null-Flächen“, also Polygone, die eine Fläche von „0“ besitzen und somit von ArcMap als fehlerhaft erkannt werden. Diese Flächen müssen herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Danach werden die Massen von Einzel-Polygonen in jeweils zusammenhängende Flächen verschmolzen (Funktion: Dissolve).

Zusätzlich zu den DXF-Lieferungen wurde eine Gesamtübersicht der Bundesländer übermittelt, in der das jeweilige Maß der 3D-Modell-Abdeckung ersichtlich ist. Aus diesem Shape konnten die Polygone, für die ein Modell vorhanden ist (BW+HE), für die weitere Bearbeitung herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Parallel zur DXF-Datei wurde in der 3D-Bearbeitung eine ASCII-Datei erzeugt, die alle Knotenpunkte mit jeweiliger NN und uGOK-Höhe enthält. Aus diesem Datensatz wird ein temporärer Punkt-Layer erzeugt (Funktion: XY-Ereignis-Layer erstellen), indem X- und Y-Spalten aus der Tabelle ausgewählt werden. Um diesen Punkt-Layer in Berechnungen verwenden zu können, muss dieser zuerst in eine neue Feature Class überführt werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Durch den Prozess des Filterns und Zuschneidens anhand der Auswahlkriterien wurden jedoch Randpunkte erzeugt, die außerhalb der Auswahlkriterien liegen.

Um diese rechnerisch entstandenen Elemente zu entfernen, werden von allen Punktdaten jeweils nur die Punkte, die einen Wert unter GOK von 290 – 1310 besitzen (10-m-Puffer), gefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

„In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen; sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann;“

Die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG wird entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, denn im jetzigen Detaillierungsgrad ist eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll.

Begründung aus dem StandAG für diese Verfahrensweise:

„Sofern für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt, soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.“ (§ 23 Abs. 3 StandAG)

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestmächtigkeit des Kristallins in Hessen wurde anhand der 3D-Modelle unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Informationen aus der Inventarisierungstabelle für das kristalline Wirtsgestein (BGE 2020I), der GÜK200 und Daten aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungsdaten der Bundesländer wurden zusätzlich herangezogen, um die Mindestmächtigkeit der ermittelten Gebiete für das kristalline Wirtsgestein zu verifizieren.

Inklusive des einzurechnenden Sicherheitsabstands von 100 m zum Einlagerungsbe-
reich in kristallinem Wirtsgestein (DBE TEC 2016), der als horizontaler als auch vertikaler
Sicherheitsabstand eingehalten werden sollte, wird eine Mindestmächtigkeit von 200 m
angesetzt. Diese 200 m Mächtigkeit ergeben sich aus 100 m Sicherheitsabstand im
Hangenden und 100 m Mindestmächtigkeit des Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG).
Da die maximale Suchteufe nach derzeitigem Stand auf 1500 m u. GOK festgelegt
wurde, muss sich die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges im Sinne der Endlage-
rung von HAW auf einem Höhenniveau von 1300 m u. GOK oder höher befinden.

Von diesem Vorgehen unbeeinflusst bleibt die Möglichkeit innerhalb des kristallinen Ge-
birgsbereichs, gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, einen homogenen Gesteinskörper
des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit (z. B. durch das Vorkommen von
magmatischen Ganggesteinen oder Restriktionen durch das vorherrschende Trennflä-
chengefüge) über den Nachweis des sicheren Einschlusses auch über das Zusammen-
wirken des kristallinen Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren zu
führen.

Nur wenige der gelieferten geologischen 3D-Modelle der SGD beinhalten eine detail-
lierte volumenbezogene geologische 3D-Modellierung der kristallinen Wirtsgesteinsein-
heiten mit zusätzlichen Informationen wie z. B. Gesteinstyp, Alter und tektonische Posi-
tion. Im Allgemeinen weisen die geologischen 3D-Landesmodelle lediglich, falls vorhan-
den, eine Topfläche des kristallinen Grundgebirges aus. Da das kristalline Grundgebirge
gewöhnlich die älteste liegende geologische Einheit bildet, wird bei der Ausweisung von
identifizierten Gebieten des Wirtsgesteins Kristallin nicht mit einem Basishorizont gear-
beitet. Nur in einigen wenigen bekannten Fällen liegen hochgradig regionalmetamorphe
Gesteine und darin enthaltene Plutonite als tektonische Decken im Hangenden von nied-
rigmetamorphen Gesteinseinheiten oder Sedimenten.

Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschluss-
wirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr 3)

Die Tiefenlage des Kristallins in Hessen wurde anhand des 3D-Modells unter Einbezie-
hung des Digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche unterhalb von 300 m
u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Für die ermit-
telten Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen
Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für kristallines Wirtsgestein wird ein Flächenbedarf von mindestens 6 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Flächen mit geringerer Ausbreitung, wie bspw. kleinere Intrusionen, werden gelöscht. Die Anwendung der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ erfolgt in ArcMAP in 2D. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen sind Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

„Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.“

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 120 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten aus den 3D-Modellen (SKUA-GOCAD) zu den Mindestanforderungen für das kristalline Wirtsgestein in Hessen dargestellt. Die Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem Protokoll zur **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** dargestellt.

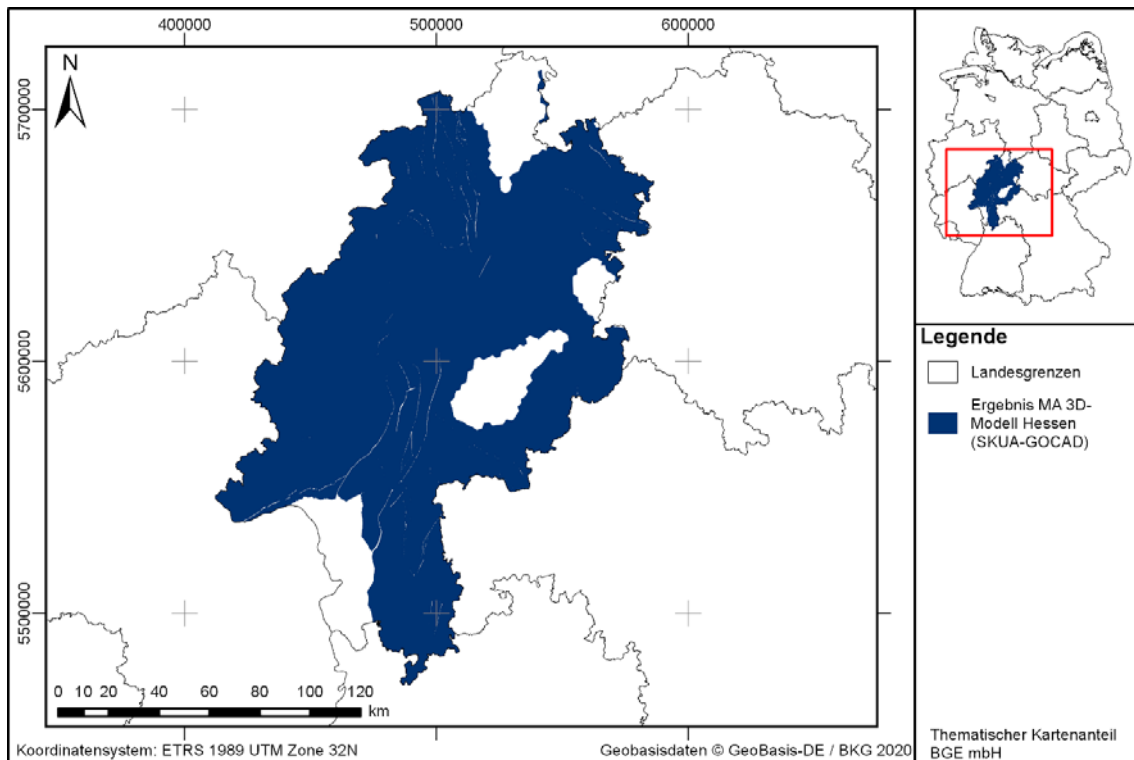


Abbildung 120: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Hessen anhand des 3D-Modells in SKUA-GOCAD

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 250 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 250: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten

DokID	Dateigruppe	Dateipfad	Beschreibung
11887793	9111	\\HE_3D-Modell\Hessen3D\GOCAD Objekte	3D-Modell

1.4.4 Nordrhein-Westfalen (NW)

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für das Kristallingestein. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Bundesland Nordrhein-Westfalen. Die Anwendung der Mindestanforderungen (Mächtigkeit und Tiefenlage) erfolgt mit Hilfe von 3D-Modellen.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Weite Teile des Grundgebirges in Nordrhein-Westfalen werden dem Rhenoharzynikum zugeordnet. Die Gesteine des Brabanter Massivs, das dem südlichen Kontinentalrand von Laurasia zugeordnet wird, wurden dabei nur gering überprägt. Lediglich das Grundgebirge im äußersten Norden des Bundeslandes befindet sich nördlich der variszischen Deformationsfront und ist nach Grabert (1998a) von der kaledonischen Orogenese erfasst.

Eine tabellarische Übersicht der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten in Nordrhein-Westfalen mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) zu finden.

Im Rheinischen Schiefergebirge stehen die Gesteine der Rhenoharzynischen Zone großräumig an der Oberfläche an. Die als „Venn-Porphyre“ bezeichneten silurischen bzw. unterdevonischen Ganggesteine des Venn-Sattels setzen sich aus Tonalit, Quarzdiabas und „Tonalitporphyrit“ zusammen. Sie besitzen jedoch nur kleinräumige Ausdehnungen und weisen eine starke Verwitterung auf (Grabert 1998a). Im nordöstlichen Nordrhein-Westfalen intrudierte nach Grabert (1998a) vermutlich während der Unterkreide (ca. 140 – 100 Mio a) der Pluton von Vlotho in einer Teufe von ca. 5 km in das Deckgebirge. Es wird eine Assoziation mit dem im Grenzgebiet zu Niedersachsen vermuteten Intrusionskörper von Bramsche angenommen. Die Plutonitkörper konnten bisher nur indirekt über Vitrinit-Reflexionen überlagernder Sedimente, geophysikalische Messungen und hydrothermale Aktivitäten nachgewiesen werden (Seibertz 2000). Aufgrund von intensiven Inkohlungsprozessen überlagernder Kohleflöze im Südwesten von Nordrhein-Westfalen wird nach Erren & Bredewout (1991) in einer Teufe von mindestens 3 km das wahrscheinlich tertiäre Erkelenzer Intrusiv vermutet. Während des Tertiär kam es nach Grabert (1998a) zu einer Heraushebung der heutigen Mittelgebirgsstruktur des Rheinischen Schiefergebirges mit einer Phase der intensiven Hebung im Miozän (ca. 23 – 5,3 Mio a).

Während des Oligozäns (ca. 34 – 23 Mio a) kam es Grabert (1998a) zufolge im Rahmen der Alpidisch-Saxonischen-Bruchfaltentektonik im Gebiet der Niederrheinischen Bucht zu einer intensiven Phase der Grabenbildung. In dem Bereich treten rezente tektonische Aktivitäten auf, die teilweise starke seismische Ereignisse bedingen können. Assoziiert mit den tektonischen Prozessen kam es im Laufe des Tertiär zur Ausbildung eines intensiven Vulkanismus in Form eines Vulkangürtels, der sich von der der Vulkaneifel über das Neuwieder Becken, das Siebengebirge, den Westerwald über die Grenze des Bundeslandes nach Osten erstreckt. Die vulkanische Aktivität setzte sich, wie das Beispiel des Laacher Sees im angrenzenden Bundesland Rheinland-Pfalz zeigt, bis in das Quartär fort.

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 251). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 251: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname
1	UNW	GD NRW	11883267_01/8849	ts	3D-Modell
2	NW	GD NRW	11883267_01/8850	xlsx	01_readme_Landesmodell_NRW
3	DE	BGE	11902082/9779	shp	Kristallin_Reinhold_Karte_Tiefenkarte.shp
4	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM200

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Tiefenlage und Flächenbedarf des Kristallingesteins in Nordrhein-Westfalen geprüft wurde, ist in Tabelle 252 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 252: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche und Dateien
1. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™): Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG25) einladen	
2. DGM zweifach kopieren und um 300 m bzw. um 1500 m absenken	
3. Zuschneiden der Kristallin-Horizonte auf den Teufenbereich > 300 m u. GOK mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	<i>DGM_-300; DGM_-1500</i>
a) Topfläche Kristallin mit abgesenktem DGM (<i>DGM_-300</i>) verschneiden	<i>KristallinNW_DGM-300</i>
b) Gebiete mit Teufen Top Kristallin < 300 m u. GOK über Push-down Befehl auf 300 m u. GOK setzen	<i>KristallinNW_DGM-300</i>
c) Unzureichend kleine Gebiete eliminieren	
4. Zuschneiden der Kristallin-Horizonte auf den Teufenbereich < 1300 m u. GOK mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Erstellung neuer Region (Teufe > 301 m u. GOK) innerhalb der Fläche Top Kristallin	
b) Region mit Teufenbereich > 1301 m u. GOK löschen	
c) Nochmaliges Filtern auf ausreichenden Flächenbedarf	
5. Anwendung großflächiger finaler AKs (Seismität, Vulkanismus)	
6. Export für ArcGIS	<i>.dxf & .txt files exportieren</i> <i>NW_K.dxf</i> <i>NW_K.txt</i>
7. 2D-Bearbeitung in ArcGIS	
a) Überführen der DXF-Datei in ArcMap	
b) Ermitteln zusammenhängender Polygone und deren Gesamtflächen	<i>NW_IG.shp</i>
c) Abdeckung des 3D-Modells (ohne Filter) als Polygon-Shape	<i>NW_HE_Umriss.shp</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche und Dateien
d) Überführen der ASCII-Datei in ArcMap	<i>NW_PktGOK_OID.shp</i>
e) Filter der Höhenpunkte auf 300 – 1300 m u. GOK	<i>NW_PktGOK_filter.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 252 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das flächendeckende Landesmodell NRW ist ein Übersichtsmodell dessen Grundlage häufig auf Ergebnissen aus unterschiedlichen Projekten beruht, deren Ergebnisflächen untereinander nicht konsistent abgestimmt wurden. Datenbasis und somit die Genauigkeit sind regional sehr unterschiedlich. Die Basisflächen Karbon Basis, Mitteldevon Basis, sowie die Einheiten "Emscher Formation" und "Wealden Formation" wurden nicht vollständig modelliert und sind lediglich angenäherte Darstellungen, um eine ungefähre Vorstellung von Tiefenlage und Mächtigkeit zu vermitteln.

Das Landesmodell weist eine Top- und elf Basisflächen für stratigraphische Einheiten sowie jeweils eine Top- und Basisfläche für Formationen auf:

- gg_q_b (Quartär Basis)
- gg_t_b (Tertiär Basis)
- gg_kroha_b (Halterner Sande Basis)
- gg_kro_b (Oberkreide Basis)
- gg_kr_b (Kreide Basis)
- gg_j_b (Jura Basis)
- gg_tr_b (Trias Basis)
- gg_z_b (Zechstein Basis)
- gg_r_b (Rotliegend Basis)
- gg_praep_t (Präperm Top)
- gg_c_b (Karbon Basis, unvollständig)
- gg_dm_b (Mitteldevon Basis, unvollständig)

Formationen:

- Emscher_Form_t (Emscher Formation Top, unvollständig)
- Emscher_Form_b (Emscher Formation Basis, unvollständig)

- Wealden_t (Wealden Top, unvollständig)
- Wealden_b (Wealden Basis, unvollständig)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 252 schrittweise beschrieben.

Für die Bearbeitungsfläche Kristallingestein wurde aus dem 3D-Modell die Topfläche gg_praep_t (Top Präperm) verwendet.

Das Digitale Geländemodell für Baden-Württemberg wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1300 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die in Teufenbereichen geringer 300 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_-300m absenekt. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unterhalb 1300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht.

In dem Bearbeitungsgebiet sind 3D-gepufferte Störungen des Ausschlusskriteriums Aktive Störungszonen vorhanden. Aus dem Verschnitt der 3D-Störungspuffer mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Ausschlussbereiche werden anschließend in der 2D-Bearbeitung in ArcGIS Pro gelöscht.

2D-Bearbeitung

Zur Ausweisung von Identifizierten Gebieten im Wirtsgestein Kristallingestein in Nordrhein-Westfalen wurden ausgewählte Tiefenkarten georeferenziert und vektorisiert. Die verwendeten Karten sind in Kapitel 3 aufgelistet.

Die Tiefeninformationen zum Top Kristallin aus der Karte „Tiefenlage des Grundgebirges“ kommt überall dort zum Einsatz, wo kein 3D-Modell vorliegt. Dabei wird die Karte auf 300–1300 m u. GOK zugeschnitten. Hierzu ist es notwendig, eine 300 m- und 1300 m u. GOK-Isolinie zu erzeugen. Im nächsten Schritt werden die Kristallin-Gebiete der Modelle mit Bereichen erweitert, die nach Zuschneiden der Tiefenkarte Kristallin im Teufenbereich 300 – 1300 m liegen.

Neben der Teufeninformation lassen sich aus der Karte „Tiefenlage des Grundgebirges“ auch Petrographische Informationen ziehen. In diesem Zuge werden Flächen, die als „sedimentäres Grundgebirge – anstehend“ deklariert sind, vertikal ausgeschlossen, da sie nicht das Kriterium „kristallines Grundgebirge im Sinne der Endlagerung von HAW“ erfüllen.

Das vorgefilterte 3D-Modell von Nordrhein-Westfalen wurde für die Bearbeitung in ArcMap als DXF-Format exportiert. Damit die Daten in den Funktionen und Berechnungen in ArcMap verwendet werden können, müssen sie entsprechend von DXF-Files in Shape-Files überführt werden (Funktion: CAD in Geodatabase). Diese Funktion erzeugt 3 Shapes (Multipatch, Polygon, Polyline). Für die weitere Bearbeitung wird das Polygon-

Shape verwendet. Durch die Vorab-Filterung in der 3D-Bearbeitung und die notwendigen Formatübertragungen entstehen „Null-Flächen“, also Polygone, die eine Fläche von „0“ besitzen und somit von ArcMap als fehlerhaft erkannt werden.

Diese Flächen müssen herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Danach werden die Massen von Einzel-Polygonen in jeweils zusammenhängende Flächen verschmolzen (Funktion: Dissolve).

Zusätzlich zu den DXF-Lieferungen wurde eine Gesamtübersicht der Bundesländer übermittelt, in der das jeweilige Maß der 3D-Modell-Abdeckung ersichtlich ist. Aus diesem Shape konnte das Polygon von Nordrhein-Westfalen für die weitere Bearbeitung herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Parallel zur DXF-Datei wurde in der 3D-Bearbeitung eine ASCII-Datei erzeugt, die alle Knotenpunkte mit jeweiliger NN- und u. GOK-Höhe enthält. Aus diesem Datensatz wird ein temporärer Punkt-Layer erzeugt (Funktion: XY-Ereignis-Layer erstellen), indem X- und Y-Spalten aus der Tabelle ausgewählt werden. Um diesen Punkt-Layer in Berechnungen verwenden zu können, muss dieser zuerst in eine neue Feature Class überführt werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Durch den Prozess des Filterns und Zuschneidens anhand der Auswahlkriterien wurden jedoch Randpunkte erzeugt, die außerhalb der Auswahlkriterien liegen.

Um diese rechnerisch entstandenen Elemente zu entfernen, werden von allen Punktdaten jeweils nur die Punkte, die einen Wert u. GOK von 290-1310 besitzen (10-m-Puffer), gefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

„In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen; sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann;“

Die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG wird entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, denn im jetzigen Detaillierungsgrad ist eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll.

Begründung aus dem StandAG für diese Verfahrensweise:

„Sofern für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt, soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.“ (§ 23 Abs. 3 StandAG)

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestmächtigkeit des Kristallins in Nordrhein-Westfalen wurde anhand der 3D-Modelle unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Informationen aus der Inventarisierungstabelle für das kristalline Wirtsgestein (BGE 2020I), der GÜK200 und Daten aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungsdaten der Bundesländer wurden zusätzlich herangezogen um die Mindestmächtigkeit der ermittelten Gebiete für das kristalline Wirtsgestein zu verifizieren.

Inklusive des einzurechnenden Sicherheitsabstands von 100 m zum Einlagerungsbe-
reich in kristallinem Wirtsgestein (DBE TEC 2016), der als horizontaler als auch vertikaler
Sicherheitsabstand eingehalten werden sollte, wird eine Mindestmächtigkeit von 200 m
angesetzt. Diese 200 m Mächtigkeit ergeben sich aus 100 m Sicherheitsabstand im
Hangenden und 100 m Mindestmächtigkeit des Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG).
Da die maximale Suchteufe nach derzeitigem Stand auf 1500 m u. GOK festgelegt
wurde, muss sich die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges im Sinne der Endlage-
rung von HAW auf einem Höhenniveau von 1300 m u. GOK oder höher befinden.

Von diesem Vorgehen unbeeinflusst bleibt die Möglichkeit innerhalb des kristallinen Ge-
birgsbereichs, gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, einen homogenen Gesteinskörper
des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit (z. B. durch das Vorkommen von
magmatischen Ganggesteinen oder Restriktionen durch das vorherrschende Trennflä-
chengefüge) über den Nachweis des sicheren Einschlusses auch über das Zusammen-
wirken des kristallinen Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren zu
führen.

Nur wenige der gelieferten geologischen 3D-Modelle der SGD beinhalten eine detail-
lierte volumenbezogene geologische 3D-Modellierung der kristallinen Wirtsgesteinsein-
heiten mit zusätzlichen Informationen wie z. B. Gesteinstyp, Alter und tektonische Posi-
tion. Im Allgemeinen weisen die geologischen 3D-Landesmodelle lediglich, falls vorhan-
den, eine Topfläche des kristallinen Grundgebirges aus. Da das kristalline Grundgebirge
gewöhnlich die älteste liegende geologische Einheit bildet, wird bei der Ausweisung von
identifizierten Gebieten des Wirtsgesteins Kristallin nicht mit einem Basishorizont gear-
beitet. Nur in einigen wenigen bekannten Fällen liegen hochgradig regionalmetamorphe
Gesteine und darin enthaltene Plutonite als tektonische Decken im Hangenden von nied-
rigmetamorphen Gesteinseinheiten oder Sedimenten.

Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschluss-
wirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr 3)

Die Tiefenlage des Kristallins in Nordrhein-Westfalen wurde anhand des 3D-Modells un-
ter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche unterhalb von
300 m u. GOK (und oberhalb von 1500 m u. GOK) erfüllen die Mindestanforderung und
wurden weiter berücksichtigt. Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung
„minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für kristallines Wirtsgestein wird ein Flächenbedarf von mindestens 6 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Flächen mit geringerer Ausbreitung, wie bspw. kleinere Intrusionen, werden gelöscht. Die Anwendung der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ erfolgt in ArcMAP in 2D. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen sind Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

„Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.“

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 121 ist Ergebnis der Bearbeitung der Daten aus den 3D-Modellen (SKUA-GOCAD) zu den Mindestanforderungen für das kristalline Wirtsgestein in Nordrhein-Westfalen dargestellt. Die Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem Protokoll zur **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** dargestellt.

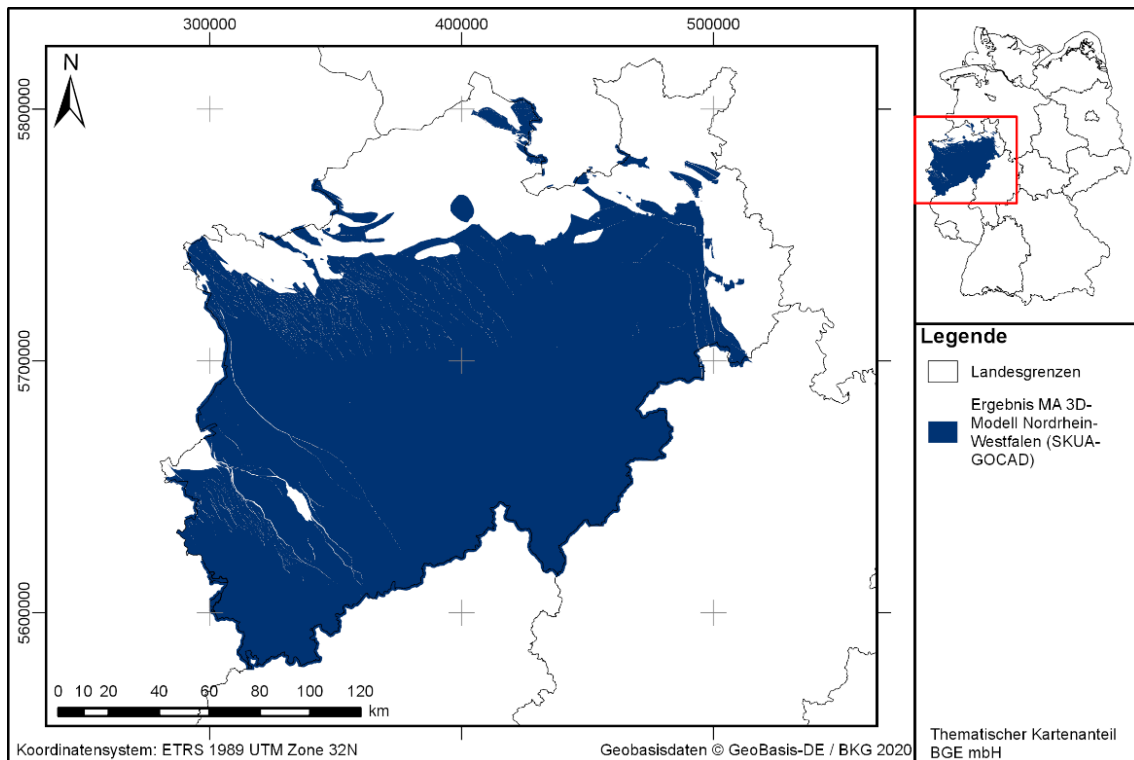


Abbildung 121: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Nordrhein-Westfalen anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 253 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 253: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten

DokID	Dateigruppe	Dateiname	Beschreibung
11883267_01	8849	3D-Modell	3D-Modell

1.4.5 Prä-Perm-Horizont des Southern Permian Basin Atlas (SBPA)

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für das Wirtsgestein Kristallin. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Norddeutschland (einschließlich der Bundesländer Schleswig-Holstein, Berlin, Bremen, Hamburg, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, sowie Teilen Nordrhein-Westfalens, Sachsens und Hessens). Die Anwendung der Mindestanforderungen (Mächtigkeit und Tiefenlage) erfolgt hier mit Hilfe von gelieferten 3D-Modellen.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Eine tabellarische Übersicht der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten in Norddeutschland mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) zu finden.

Geologische Übersicht Kristallin Niedersachsen

Das Grundgebirge von Niedersachsen bilden die Gesteine des Terrans Avalonia, die von mehreren Kilometer mächtigen Deckgebirgsschichten überlagert sind. Nördlich der variszischen Deformationsfront sind die Gesteine des überdeckten Grundgebirges nach Meschede (2018) vermutlich cadomischen (ca. 650 – 505 Ma) Ursprungs. Die Tiefengesteine südlichen der variszischen Deformationsfront sind von der variszischen Orogenese erfasst und werden dem Rhenoheryzynikum zugeordnet (Franke 2000).

Im Harz sind diese Gesteine der Rhenoheryzynischen Zone in Form von variszischen tektonischen Decken als komplexe Gebirgsaufschlüsse anstehend (Stephan et al. 2016). Als großräumige kristalline Wirtsgesteine sind für den niedersächsischen Teil des Harzes die synorogenen, karbonischen Intrusionskörper, wie die Harzburger Gabbros (Rothe 2019), die Granite bzw. Diorite des Brocken-Plutons (Zech et al. 2010) sowie der Oker- und der Ilsenstein-Granit zu nennen. Ein weiteres Produkt des karbonischen Magmatismus sind Ganggesteine, wie z. B. Kersantite (Elbracht et al. 2016). Der Großteil des Okerplutons befindet sich dabei auf dem Gebiet des Bundeslandes Sachsen-Anhalt. Ein weiteres großräumiges kristallines Wirtsgestein ist der 1000 m mächtige, untergliederte Eckergneiskomplex, dessen devonische Ausgangsgesteine granulitfaziell und amphibolitfaziell metamorph überprägt wurden (Martin-Gombojav 2003). Die Heraushe-

bung des Mittelgebirges Harz erfolgte entlang der Harz-Nordrand-Störung ab der Oberkreide (ca. 90 Ma) und Erosionsprozesse der Deckgebirgsschichten führten zu einer Freilegung der Kristallingesteine (von Eynatten et al. 2019).

Im westlichen Niedersachsen wird in einer Teufe von ca. 5 km der Bramscher Pluton vermutet, der während der Oberkreide (ca. 100 – 66 Ma) intrudierte. Er konnte bisher nur indirekt über Vitrit-Reflexionen überlagernder Sedimente, geophysikalische Messungen und hydrothermale Aktivitäten nachgewiesen werden (Seibertz 2000).

Geologische Übersicht Kristallin Mecklenburg-Vorpommern

Die Struktur des tiefen geologischen Untergrunds von Mecklenburg-Vorpommern ist nach Katzung (2004a) durch die kaledonische Orogenese geprägt worden. Baltica, als Teil des osteuropäischen Kratons, und das Terran Avalonia kollidierten während des Ordovizium und Silur (ca. 485 – 444 Millionen Jahren). Im Bereich der südlichen Ostsee bis nach Vorpommern (Hoffmann et al. 1998) bildet das mesoproterozoische, danopolonische Kristallin (ca. 1450 Ma) des osteuropäischen Kratons das Grundgebirge und wird von altpaläozoischen Sedimenten überlagert, bis es im südlichen Verlauf in großer Tiefe von den Gesteinen der westeuropäischen Plattform überlagert wird. Große Teile Mecklenburgs sind dem variszischen Vorland zuzuordnen. Der äußerste Süden des Landes ist dabei von der variszischen Deformationsfront erfasst und Teil des Rhenoherynikums. Das Deckgebirge überdeckt alle Bereiche des Bundeslandes und erreicht im Zentrum der Mitteleuropäischen Senke Mächtigkeiten von bis zu 10 km. In der Bohrung Schwerin 1 sind in einer Teufe von 7262,5 m – 7343 m (Endteufe) mesoproterozoische Anorthosite und Gabbros (min. 1480 – 1460 Millionen Jahren) als Xenolithe in permischen Vulkaniten (Rotliegend) aufgeschlossen (Katzung et al. 2004). Die Xenolithe sind ein Hinweis auf das kristalline Grundgebirge in großer Teufe.

Durch die Offshore-Bohrung G14-1 nordöstlich von Arkona (Rügen) wurde in einer Teufe von 1941 bis 1997 m (Endteufe) das mesoproterozoische, danopolonische Kristallingestein des osteuropäischen Kratons aufgeschlossen. Nach Katzung et al. (2004) handelt es sich um einen feinkörnigen, schwach porphyrischen, Kalifeldspat-reichen Biotitgranit mit einem monzogranitischen Modalbestand. Die Mineralzusammensetzung des Biotitgranits lässt sich wie folgt zusammenfassen: Kalifeldspat (vorwiegend Mikroklin) 37 %, Plagioklas 30 %, Quarz 21 % und Biotit 8 %. Akzessorisch treten Titanit, Epidot und Apatit auf. Die Plagioklase wurden partiell in Serizit, Tonminerale, Calcit und Epidot umgewandelt. Nach Blankenburg & Rösler (1978) kann eine solche Umwandlung nur durch eine Lösungs- und Fällungsreaktion erfolgen. Zudem kam es teilweise zu einer Umwandlung von Biotit zu Chlorit und Calcit. Die feinkörnige (0,2 – 0,5 mm) Grundmasse des Gesteins wird durch Katzung et al. (2004) als granoblastisch und teilweise poikiloblastisch bezeichnet. Es existieren bis zu 20 mm große Einsprenglinge von Plagioklas. Stellenweise konnten leukokrate, pegmatitische Schlieren identifiziert werden. Es wird eine durchschnittliche Foliation von 45° beobachtet. Das Gestein enthält kataklastisch bis mylonitisch zerscherte sowie teilweise rekristallisierte Bereiche. Diese Bereiche treten ebenfalls an der Grenze zu den hangenden unterkambrischen Gesteinen auf. Die

Kataklasezonen sind unscharf abgegrenzt und sind im Vergleich zur Foliation mit 40 °– 60° gegenläufig einfallend. Während der kaledonischen Orogenese wurden im Norden Mecklenburg-Vorpommerns bis zur kaledonischen Deformationsfront die Rügen-Kaledoniden auf die altpaläozoischen Sedimente und das liegende Kristallingestein des osteuropäischen Kratons überschoben. Die Rügen-Kaledoniden bauen sich aus mehrere Kilometer mächtigen Einheiten neoproterozoischer bis ordovizischer (ca. 1000 – 444 Millionen Jahren) Gesteine auf. Südlich der „Rügen-Schwelle“ überlagern jungpaläozoische Formationen die Gesteine der Kaledoniden.

Geologische Übersicht Kristallin Sachsen-Anhalt

Kristalline Wirtsgesteine stehen in Sachsen-Anhalt im Harz an und sind im S des Bundeslandes unter jüngerer sedimentärer Überdeckung in einem Bereich von Halle über Dessau bis östlich der Elbe verbreitet (Bankwitz et al. 2001). Der großstrukturelle Bereich im geologischen Untergrund des südlichen Sachsen-Anhalts wird der Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) zugeordnet (Brinkmann 1948; Kopp et al. 2001). Die MKZ ist eine Zone aus variszischen Kristallingesteinen, die in deutschen Mittelgebirgsregionen (Pfälzer Wald, Odenwald, Spessart, Ruhlaer Kristallin im Thüringer Wald und Kyffhäuser) an der Oberfläche aufgeschlossen sind und sich unter sedimentärer Überdeckung bis an die polnische Grenze fortsetzt (Zeh & Will 2008).

Die kristallinen Einheiten im Harz gehören zum Rhenoherynikum und stellen einen komplexen Grundgebirgsaufschluss aus variszischen tektonischen Decken dar (Stephan et al. 2016). Großflächige kristalline Wirtsgesteine im Harz sind v. a. der Eckerneis, der Gabbro bei Bad Harzburg und die Granite des Brocken- und Ramberg-Plutons (Martin-Gombojav 2003; Zech et al. 2010). Das heutige Mittelgebirge Harz wurde erst in der Oberkreide aus dem tiefen kristallinen Grundgebirgsniveau des Rhenoherynikums in die heutige Höhenlage herausgehoben (von Eynatten et al. 2019). Nordöstlich des Harzes wurden im Bereich des ebenfalls invertierten tektonischen Blocks von Flechtingen-Roßlau kristallines Wirtsgestein erbohrt. Die Bohrung Flechtingen (FI 1/82) hat in einer Teufe von 575 – 1046 m Syenogranit angetroffen. Anhand mehrerer geophysikalischer Indikatoren und der kartierten kontaktmetamorphen Gesteine im Umfeld wird die Ausdehnung des Granits von Flechtingen auf 10 × 4 km geschätzt (Bauer et al. 1995; Ehling 2008).

Die metamorphen und magmatischen Gesteine in der MKZ in Sachsen-Anhalt sind v. a. Gneise (z. B. Bohrungen bei Hohnsdorf) sowie Granite, Granodiorite und Diorite (z. B. Bohrungen bei Dessau) (Bankwitz et al. 2001; Kopp et al. 2001). Die mächtigsten erbohrten Intrusionen in Sachsen-Anhalt sind Teil des variszischen Plutonitkomplexes von Pretzsch-Prettin-Schönwalde (Kopp et al. 2001). Die Plutone von Pretzsch und Prettin liegen in den Bundesländern Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Sachsen und bestehen überwiegend aus Biotit-Granodioriten, amphibol-führenden Biotit-Granodioriten, Dioriten, Tonaliten und Gabbros (Kopp et al. 2001).

Geologische Übersicht Kristallin Brandenburg

Kristallines Wirtsgestein ist im südlichen Brandenburg nur unter jüngerer sedimentärer Überdeckung (z. T. überlagert von Formationen aus dem Zechstein und Mesozoikum; vorwiegend Känozoikum) verbreitet; Stackebrandt & Franke 2015). Plutonite und hochmetamorphe Gesteine sind durch etliche Tiefbohrungen in einem Bogen von Schönewalde über Luckau und Cottbus bis an die polnische Grenze bei Guben erbohrt worden (Kopp et al. 2001; Zeh & Will 2008). Dieser großstrukturelle Bereich im tieferen geologischen Untergrund von Südbrandenburg wird der Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) zugeordnet (Brinkmann 1948; Kopp et al. 2001; Scholtz 1930). Die MKZ ist ein mehr als 350 km langer Gürtel aus variszischen Kristallingesteinen, die in deutschen Mittelgebirgsregionen (Pfälzer Wald, Odenwald, Spessart, Ruhlaer Kristallin im Thüringer Wald und Kyffhäuser) an der Oberfläche aufgeschlossen sind (Zeh & Will 2008).

Metamorphe Gesteine der MKZ, die durch Bohrungen in Südbrandenburg aufgeschlossen sind, können allesamt dem Metamorphosegrad der Amphibolitfazies zugeordnet werden und sind überwiegend Orthogneise, Paragneise, Amphibolite und Glimmerschiefer. Die metamorphen Gesteine zeigen ein variszisches Metamorphosealter von ca. 340 Ma an (Stackebrandt & Franke 2015), das charakteristisch für die letzte regionalmetamorphe Hauptphase im Saxothuringikum und der MKZ ist (Kroner & Romer 2013).

In die metamorphen Einheiten der MKZ intrudierten Plutonite, wie z. B. Granite, Granodiorite, Diorite und Gabbros, im Zuge oder nach der variszischen Gebirgsbildung (Kopp et al. 2001; Stackebrandt & Franke 2015; Zeh & Will 2008). Der Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönewalde liegt in den Bundesländern Sachsen-Anhalt, Brandenburg und ein kleiner Teil davon in Sachsen. Der Teilpluton Schönewalde befindet sich einzig komplett in Brandenburg. Er besteht überwiegend aus mittelkörnigen Biotit-Granodioriten und untergeordnet aus amphibolführenden Biotit-Granodioriten und Graniten, grobkörnig-porphyrischen Syenodioriten sowie mafischen Magmatiten, mit Modalbeständen von Gabbrodiorit bis Gabbronorit (Kopp et al. 2001). Es wurden zahlreiche felsische und mafische Ganggesteine erbohrt, die zusammen mit dem Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönewalde auftreten (Kopp et al. 2001).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 254). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 254: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei- gruppe	Daten- format	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BGE	11902082/ 9769	ts	\\AP1_2\AP1_2\D_24 0_ro\SKUA_Export	Basis Rotliegend aus SPBA im GO- CAD-Format
3	DE	BKG	11875056/ 7727	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales-Gelände- Modell

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Kristallins in Norddeutschlands geprüft wurde, ist in Tabelle 255 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 255: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™); Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Digitale Geländemodelle von BB, HE, HH, MV, NI, NW, SH, SN und ST zusammenführen	<i>DGM_NordD.ts</i>
a) Umrisskurve Norddeutschlands inklusive der 12-Seemeilen-Zone aus den Verwaltungsgrenzen erstellen	
b) DGM mit Hilfe des GOCAD Workflows „Structural Modeling“ auf die Umrisskurve Norddeutschlands inklusive 12-Seemeilen-Zone ausweiten	<i>DGM_NordD_12mile.ts</i>
c) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1300 m (DGM_-1300m) absenken	<i>DGM_NordD_300.ts;</i> <i>DGM_NordD_1300.ts</i>

d) Kristallin-Fläche aus SPBA auf Umriss Norddeutschland zuschneiden und Gebiete außerhalb der Kurve löschen	<i>K_NordD.ts</i>
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1500 m u. GOK liegen, ausschneiden und löschen	<i>K_NordD_1300.ts</i>
f) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, auf -300 m u. GOK herabsenken	<i>K_NordD_1300_300.ts</i>
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	<i>K_NordD_1300_300_qs.ts</i>
h) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Export der Kurven zur Weiterbearbeitung in 2D	
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	<i>MG_K_NordD.dxf</i>
j) 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Pro	
3. Überführen der DXF-Datei in ArcMap	
a) Ermitteln zusammenhängender Polygone und deren Gesamtflächen	<i>NordD_IG.shp</i>
b) Abdeckung des 3D-Modells (ohne Filter) als Polygon-Shape	<i>NordD_Umriss.shp</i>
c) Überführen der ASCII-Datei in ArcMap	<i>NordD_PktGOK_OID.shp</i>
d) Filter der Höhenpunkte auf 300-1300 uGOK	<i>NordD_PktGOK_OID.shp</i>
e) Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™); Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 255 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete 3D-Modell für die Basis der Rotliegendesedimente in Norddeutschland wurde im Rahmen der Standortauswahl durch externe Dienstleister auf Basis des

2D-Kartenwerkes des SPBA erstellt (Doornenbal & Stevenson 2010). Auf Basis von Iso-
linien wurden Hilfsflächen modelliert, deren Verschneidungen und Durchdringungen ent-
fernt wurden. Aus diesen Hilfsflächen wurde die Basisfläche modelliert.

Als Bearbeitungsfläche wurde aus dem 3D-Modell die Basisfläche Rotliegendsedimente
(*ST_240_ro_iso_rev01*) verwendet.

Die Digitalen Geländemodelle für die Bundesländer Brandenburg (BB), Hessen (HE),
Hamburg (HH), Mecklenburg-Vorpommern (MV), Niedersachsen (NI), Nordrhein-West-
falen (NW), Schleswig-Holstein (SH), Sachsen (SN) und Sachsen-Anhalt (ST) wurden
eingeladen und zu einem gemeinsamen Digitalen Geländemodell zusammengeführt.
Aus dem Umriss der Verwaltungsgrenzen der Bundesländer inklusive der 12-Seemeilen-
Zone wurde eine Kurve erstellt. Das Digitale Geländemodell Norddeutschlands
(*DGM_NordD.ts*) wurde mit Hilfe des GOCAD Workflows „Structural Modeling“ auf diese
Kurve interpoliert. Jeweils eine Kopie des Digitalen Geländemodells Norddeutschlands
wurde um 300 m und 1500 m in die Tiefe versetzt. Gebiete der Basisfläche Rotliegend-
sedimente (*ST_240_ro_iso_rev01*), welche außerhalb des Digitalen Geländemodells
Norddeutschlands inklusive der 12-Seemeilen Zone (*DGM_NordD_12mile.ts*) lagen,
wurden ausgeschnitten und gelöscht. Anschließend wurden die resultierende Fläche
(*K_NordD.ts*) mit den beiden herabgesetzten DGM verschnitten
(*K_NordD_1300_300.ts*).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete
Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet,
dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1300 m
u. GOK) eingehalten werden.

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen mit Sicherheitsabständen. Die
Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht
vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche
wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Ab-
stand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine auto-
matisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert. Diese Aus-
schlussbereiche wurden im DXF-Format für die länderübergreifende Weiterbearbeitung
exportiert.

2D-Bearbeitung

Das vorgefilterte 3D-Modell und dessen gesamter Abdeckungsbereich wurden für die
Bearbeitung in ArcMap als DXF -Format exportiert. Damit die Daten in den Funktionen
und Berechnungen in ArcMap verwendet werden können, müssen sie entsprechend von
DXF-Files in Shape-Files überführt werden (Funktion: CAD in Geodatabase).

Diese Funktion erzeugt für das gefilterte 3D-Modell 3 Shapes (Multipatch, Polygon, Po-
lyline). Für die weitere Bearbeitung wird das Polygon-Shape verwendet. Durch die

Vorab-Filterung in der 3D-Bearbeitung und die notwendigen Formatübertragungen entstehen „Null-Flächen“, also Polygone, die eine Fläche von „0“ besitzen und somit von ArcMap als fehlerhaft erkannt werden.

Diese Flächen müssen herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Danach werden die Massen von Einzel-Polygonen in jeweils zusammenhängende Flächen verschmolzen (Funktion: Dissolve).

Das DXF des Umrisses beinhaltet Polylinien. Da für ein Flächenbasiertes Ausschneiden Polygon-Shapes nötig sind, muss der Datensatz zuerst in Polygone umgeformt werden (Funktionen: Feature-Class in Feature-Class + Feature in Polygon).

Parallel zur DXF-Datei wurde in der 3D-Bearbeitung eine ASCII-Datei erzeugt, die alle Knotenpunkte mit jeweiliger NN und u. GOK-Höhe enthält. Aus diesem Datensatz wird ein temporärer Punkt-Layer erzeugt (Funktion: XY-Ereignis-Layer erstellen), indem X- und Y-Spalten aus der Tabelle ausgewählt werden. Um diesen Punkt-Layer in Berechnungen verwenden zu können, muss dieser zuerst in eine neue Feature Class überführt werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Durch den Prozess des Filterns und Zuschneidens anhand der Auswahlkriterien wurden jedoch Randpunkte erzeugt, die außerhalb der Auswahlkriterien liegen.

Um diese rechnerisch entstandenen Elemente zu entfernen, werden von allen Punktdaten jeweils nur die Punkte, die einen Wert u. GOK von 290-1310 besitzen (10-m-Puffer), gefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

„In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen; sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann;“

Die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG wird entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, denn im jetzigen Detaillierungsgrad ist eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll.

Begründung aus dem StandAG für diese Verfahrensweise:

„Sofern für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt, soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.“ (§ 23 Abs. 3 StandAG)

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestmächtigkeit des Kristallins in Norddeutschland wurde anhand der 3D-Modelle unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Informationen aus der Inventarisierungstabelle für das kristalline Wirtsgestein (BGE 2020I), der GÜK200 und Daten aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungsdaten der Bundesländer wurden zusätzlich herangezogen um die Mindestmächtigkeit der ermittelten Gebiete für das kristalline Wirtsgestein zu verifizieren.

Inklusive des einzurechnenden Sicherheitsabstands von 100 m zum Einlagerungsbe-
reich in kristallinem Wirtsgestein (DBE TEC 2016), der als horizontaler als auch vertikaler
Sicherheitsabstand eingehalten werden sollte, wird eine Mindestmächtigkeit von 200 m
angesetzt. Diese 200 m Mächtigkeit ergeben sich aus 100 m Sicherheitsabstand im
Hangenden und 100 m Mindestmächtigkeit des Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG).
Da die maximale Suchteufe nach derzeitigem Stand auf 1500 m u. GOK festgelegt
wurde, muss sich die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges im Sinne der Endlage-
rung von HAW auf einem Höhenniveau von 1300 m u. GOK oder höher befinden.

Von diesem Vorgehen unbeeinflusst bleibt die Möglichkeit innerhalb des kristallinen Ge-
birgsbereichs, gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, einen homogenen Gesteinskörper
des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit (z. B. durch das Vorkommen von
magmatischen Ganggesteinen oder Restriktionen durch das vorherrschende Trennflä-
chengefüge) über den Nachweis des sicheren Einschlusses auch über das Zusammen-
wirken des kristallinen Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren zu
führen.

Nur wenige der gelieferten geologischen 3D-Modelle der SGD beinhalten eine detail-
lierte volumenbezogene geologische 3D-Modellierung der kristallinen Wirtsgesteinsein-
heiten mit zusätzlichen Informationen wie z. B. Gesteinstyp, Alter und tektonische Posi-
tion. Im Allgemeinen weisen die geologischen 3D-Landesmodelle lediglich, falls vorhan-
den, eine Topfläche des kristallinen Grundgebirges aus. Da das kristalline Grundgebirge
gewöhnlich die älteste liegende geologische Einheit bildet, wird bei der Ausweisung von
identifizierten Gebieten des Wirtsgesteins Kristallin nicht mit einem Basishorizont gear-
beitet. Nur in einigen wenigen bekannten Fällen liegen hochgradig regionalmetamorphe
Gesteine und darin enthaltene Plutonite als tektonische Decken im Hangenden von nied-
rigmetamorphen Gesteinseinheiten oder Sedimenten.

Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschluss-
wirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr 3)

Die Tiefenlage des Kristallins in Norddeutschland wurde anhand des 3D-Modells (SPBA)
unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche unterhalb
von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt.
Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des ein-
schlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für kristallines Wirtsgestein wird ein Flächenbedarf von mindestens 6 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Flächen mit geringerer Ausbreitung, wie bspw. kleinere Intrusionen, werden gelöscht. Die Anwendung der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ erfolgt in ArcMAP in 2D. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen sind Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird nach der Ausweisung der Identifizierten Gebiete erneut geprüft. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

„Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.“

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 122 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten aus den 3D-Modellen (SKUA-GOCAD) zu den Mindestanforderungen für das kristalline Wirtsgestein in Norddeutschland dargestellt. Die Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem Protokoll zur **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** dargestellt.

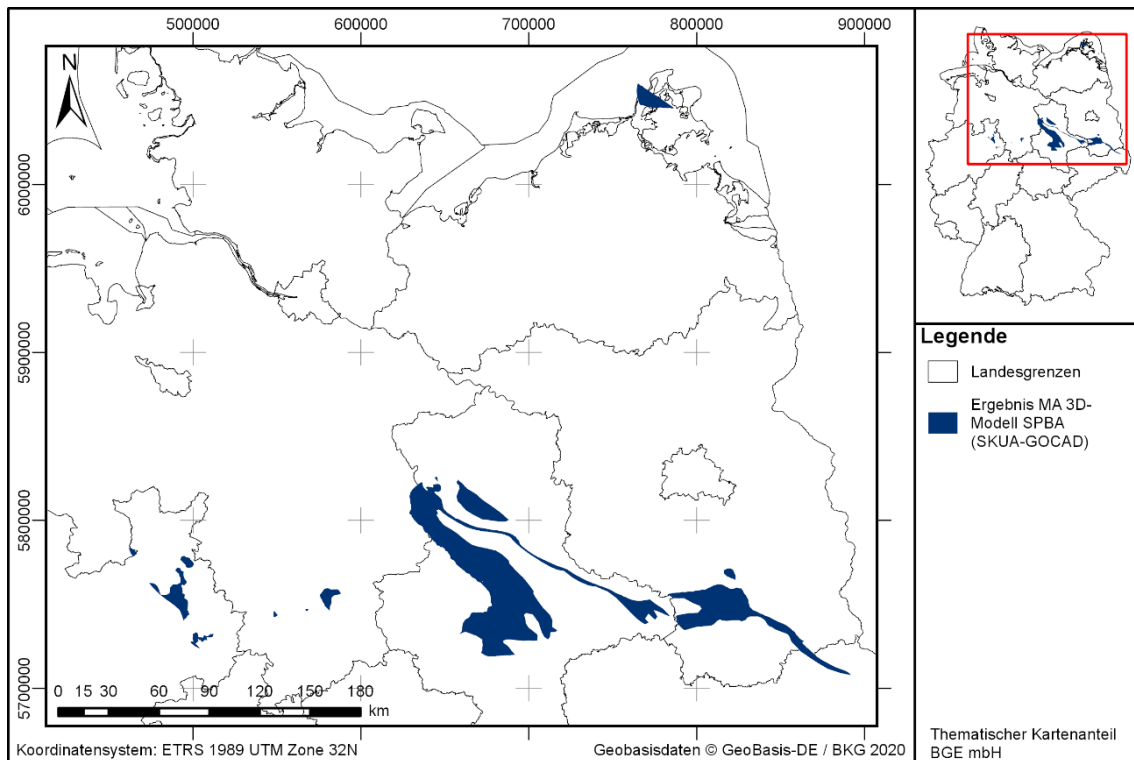


Abbildung 122: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Norddeutschland anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 256 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 256: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten

DokID	Datei- gruppe	Dateiname	Beschreibung
11902082	9769	\\AP1_2\AP1_2\D_240_ro\SKUA_Export	Basis Rotliegend aus SPBA im GOCAD-Format

1000 m) von Rotliegend- und Buntsandstein-Einheiten im Pfälzer Wald; gut zu erkennen sind Südsüdwest-Nordnordost streichenden Abschiebungen im Osten, die bei der Anlage des Oberrheingrabens entstanden sind.

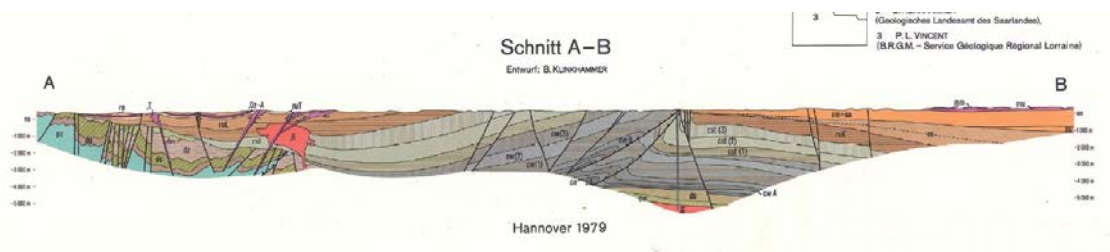


Abbildung 124 Schematischer geologischer Schnitt durch das Saar-Nahe-Becken (GÜK200 – CC 7102 Saarbrücken); Schnittlage Nordwest-Südost. Die Forschungsbohrung Saar 1 im Zentrum des Saar-Nahe-Beckens durchteuft Einheiten des Karbon und Devon und endet in Granit (in Rot dargestellt); Grundgebirge im NE des geologischen Schnitts sind devonische Einheiten (Tonschiefer, Sandsteine und Grauwacken).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 257). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 257: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname
1	RP	UMBWL	11842115/2895	ovr	\3b\GeORG-Modell
1	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)
2	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Tiefenlage und Flächenbedarf des Kristallingesteins in Rheinland-Pfalz geprüft wurde, ist in Tabelle 258 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 258: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™): Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG25) einladen	
2. DGM zweifach kopieren und um 300 m bzw. um 1500 m absenken	
3. Zuschneiden der Kristallin-Horizonte auf den Teufenbereich > 300 m u. GOK mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	<i>DGM_-300; DGM_-1500</i>
a) Topfläche Kristallin mit abgesenktem DGM (<i>DGM_-300</i>) verschneiden	<i>KristallinRP_DGM-300</i>
b) Gebiete mit Teufen Top Kristallin <300m u. GOK über Push-down Befehl auf 300m u. GOK setzen	<i>KristallinRP_DGM-300</i>
c) Unzureichend kleine Gebiete eliminieren	
4. Zuschneiden der Kristallin-Horizonte auf den Teufenbereich < 1300 m u. GOK mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Erstellung neuer Region (Teufe >1301m u. GOK) innerhalb der Fläche Top Kristallin	
b) Region mit Teufenbereich >1301 m u. GOK löschen	
c) Nochmaliges Filtern auf ausreichenden Flächenbedarf	
5. Anwendung großflächiger finaler AKs (Seismizität, Vulkanismus)	
6. Export für ArcGIS	<i>.dxf & .txt files exportieren RP_K.dxf RP_K.txt PR_3D_Modell_Umriss.dxf</i>
7. 2D-Bearbeitung in ArcGIS	
a) Überführen der DXF-Datei in ArcMap	
b) Ermitteln zusammenhängender Polygone und deren Gesamtflächen	<i>RP_IG.shp</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Abdeckung des 3D-Modells (ohne Filter) als Polygon-Shape	<i>RP_UmrissClip.shp</i>
d) Überführen der ASCII-Datei in ArcMap	<i>RP_PktGOK_OID.shp</i>
e) Filter der Höhenpunkte auf 300-1300 u. GOK	<i>RP_PktGOK_filter.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 258 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell ist das GeORG-Modell, dass in einem EU-Projekt entstand und vom Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau von Baden-Württemberg (LGRB) zur Verfügung gestellt wurde. Das GeORG Modell ist ein detailliertes Modell des Oberrheingrabens und bildet 12 stratigraphische Einheiten sowie Störungsflächen ab (GeORG-Projektteam 2013a, 2013b):

- Basis Lockergesteine (010_blg)
- Basis Landau-Formation (020_bhy)
- Basis Froidefontaine-Formation (040_bff)
- Basis Tertiär (050_bt)
- Basis Oberjura (060_bjo)
- Oberfläche Hauptrogenstein (070_thr)
- Basis Unterjura (090_bju)
- Basis Keuper (100_tms)
- Oberfläche Muschelkalksalinar (110_tms)
- Basis Muschelkalk (120_bmu)
- Basis Trias (130_btr)
- Oberfläche Grundgebirge (170_tkr)

Für die Bearbeitungsfläche Kristallingestein wurde aus dem 3D-Modell die Topfläche Oberfläche Grundgebirge (170_tkr) verwendet.

Das Digitale Geländemodell für Rheinland-Pfalz wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1300 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die in Teufenbereichen geringer 300 m u. GOK liegen, wurden auf die Tiefenlage des DGM_-

300m abgesenkt. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unterhalb 1300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht.

2D-Bearbeitung

Das vorgefilterte 3D-Modell und dessen gesamter Abdeckungsbereich wurden für die Bearbeitung in ArcMap als DXF-Format exportiert (Arbeitsschritte in Tabelle 258). Damit die Daten in den Funktionen und Berechnungen in ArcMap verwendet werden können, müssen sie entsprechend von DXF-Files in Shape-Files überführt werden (Funktion: CAD in Geodatabase). Diese Funktion erzeugt für das gefilterte 3D-Modell 3 Shapes (Multipatch, Polygon, Polyline). Für die weitere Bearbeitung wird das Polygon-Shape verwendet. Durch die Vorab-Filterung in der 3D-Bearbeitung und die notwendigen Formatübertragungen entstehen „Null-Flächen“, also Polygone, die eine Fläche von „0“ besitzen und somit von ArcMap als fehlerhaft erkannt werden.

Diese Flächen müssen herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Danach werden die Massen von Einzel-Polygonen in jeweils zusammenhängende Flächen verschmolzen (Funktion: Dissolve).

Das DXF des Umrisses beinhaltet ebenfalls Polygone und kann entsprechend direkt verwendet werden. Hier ist zu beachten, dass die Modellabdeckung über die Grenze von Deutschland hinausgeht und das Umrisspolygon demnach vor der Weiterverarbeitung ausgeschnitten werden muss (Funktion: Ausschneiden).

Parallel zur DXF-Datei wurde in der 3D-Bearbeitung eine ASCII-Datei erzeugt, die alle Knotenpunkte mit jeweiliger NN und uGOK-Höhe enthält. Aus diesem Datensatz wird ein temporärer Punkt-Layer erzeugt (Funktion: XY-Ereignis-Layer erstellen), indem X- und Y-Spalten aus der Tabelle ausgewählt werden. Um diesen Punkt-Layer in Berechnungen verwenden zu können, muss dieser zuerst in eine neue Feature Class überführt werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Durch den Prozess des Filterns und Zuschneidens anhand der Auswahlkriterien wurden jedoch Randpunkte erzeugt, die außerhalb der Auswahlkriterien liegen.

Um diese rechnerisch entstandenen Elemente zu entfernen, werden von allen Punktdaten jeweils nur die Punkte, die einen Wert u. GOK von 290-1310 besitzen (10-m-Puffer), gefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

„In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen; sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann;“

Die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG wird entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, denn im jetzigen

Detailierungsgrad ist eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll.

Begründung aus dem StandAG für diese Verfahrensweise:

„Sofern für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt, soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.“ (§ 23 Abs. 3 StandAG)

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestmächtigkeit des Kristallins in Rheinland-Pfalz wurde anhand der 3D-Modelle unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Informationen aus der Inventarisierungstabelle für das kristalline Wirtsgestein (BGE 2020I), der GÜK200 und Daten aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungsdaten der Bundesländer wurden zusätzlich herangezogen um die Mindestmächtigkeit der ermittelten Gebiete für das kristalline Wirtsgestein zu verifizieren.

Inklusive des einzurechnenden Sicherheitsabstands von 100 m zum Einlagerungsbereich in kristallinem Wirtsgestein (DBE TEC 2016), der als horizontaler als auch vertikaler Sicherheitsabstand eingehalten werden sollte, wird eine Mindestmächtigkeit von 200 m angesetzt. Diese 200 m Mächtigkeit ergeben sich aus 100 m Sicherheitsabstand im Hangenden und 100 m Mindestmächtigkeit des Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG). Da die maximale Suchteufe nach derzeitigem Stand auf 1500 m u. GOK festgelegt wurde, muss sich die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges im Sinne der Endlagerung von HAW auf einem Höhenniveau von 1300 m u. GOK oder höher befinden.

Von diesem Vorgehen unbeeinflusst bleibt die Möglichkeit innerhalb des kristallinen Gebirgsbereichs, gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, einen homogenen Gesteinskörper des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit (z. B. durch das Vorkommen von magmatischen Ganggesteinen oder Restriktionen durch das vorherrschende Trennflächengefüge) über den Nachweis des sicheren Einschlusses auch über das Zusammenwirken des kristallinen Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren zu führen.

Nur wenige der gelieferten geologischen 3D-Modelle der SGD beinhalten eine detaillierte volumenbezogene geologische 3D-Modellierung der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten mit zusätzlichen Informationen wie z. B. Gesteinstyp, Alter, und tektonische Position. Im Allgemeinen weisen die geologischen 3D-Landesmodelle lediglich, falls vorhanden, eine Topfläche des kristallinen Grundgebirges aus. Da das kristalline Grundgebirge gewöhnlich die älteste liegende geologische Einheit bildet, wird bei der Ausweisung von identifizierten Gebieten des Wirtsgesteins Kristallin nicht mit einem Basishorizont gearbeitet. Nur in einigen wenigen bekannten Fällen liegen hochgradig regionalmetamorphe

Gesteine und darin enthaltene Plutonite als tektonische Decken im Hangenden von niedrigmetamorphen Gesteinseinheiten oder Sedimenten.

Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr 3)

Die Tiefenlage des Kristallins in Rheinland-Pfalz wurde anhand des 3D-Modells unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK (und oberhalb von 1500 m u. GOK) erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für kristallines Wirtsgestein wird ein Flächenbedarf von mindestens 6 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Flächen mit geringerer Ausbreitung, wie bspw. kleinere Intrusionen, werden gelöscht. Die Anwendung der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ erfolgt in ArcMAP in 2D. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen sind Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird erneut nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete geprüft. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

„Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.“

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 125 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten aus den 3D-Modellen (SKUA-GOCAD) zu den Mindestanforderungen für das kristalline Wirtsgestein in Rheinland-Pfalz dargestellt. Die Ausweisung der identifizierten Gebiete ist einem Protokoll zur **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** dargestellt.

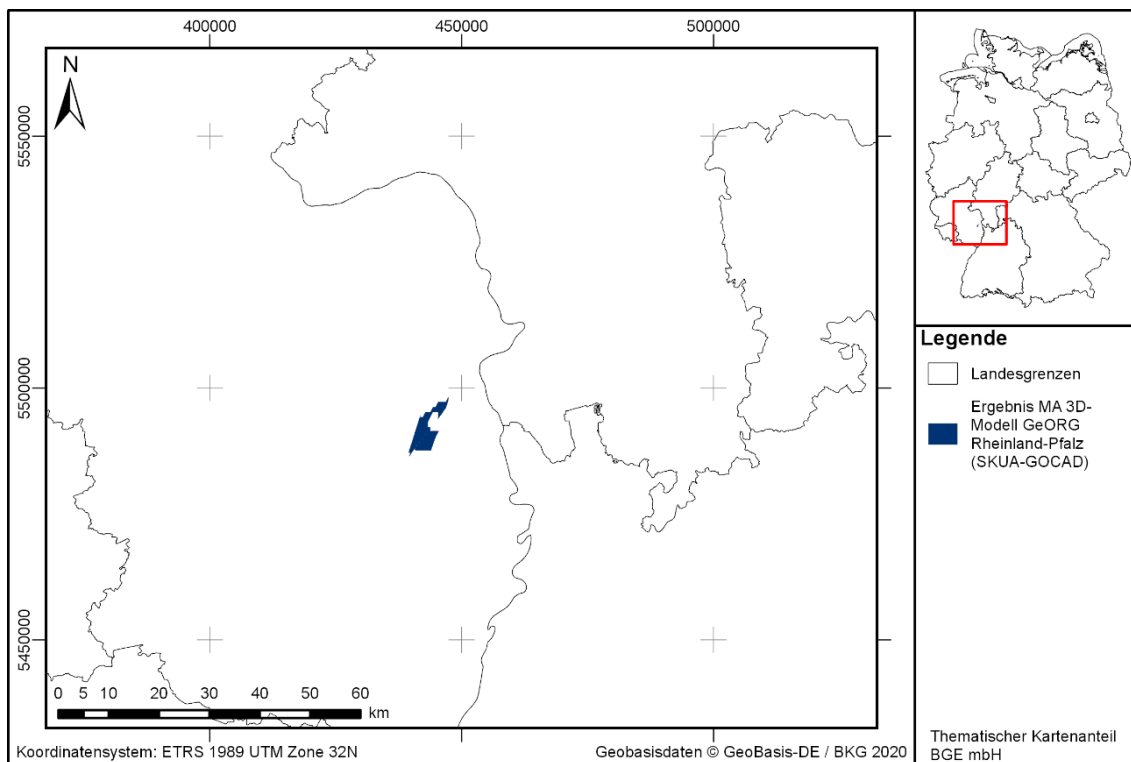


Abbildung 125: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Rheinland-Pfalz anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 259 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 259: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten

DokID	Datei- gruppe	Dateiname	Beschreibung
11842115	2895	\3b\GeORG-Modell	3D-Modell des Oberrhein- grabens

1.4.7 Sachsen (SN)

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für das Wirtsgestein Kristallin. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet in Sachsen. Die Anwendung der Mindestanforderungen (Mächtigkeit und Tiefenlage) erfolgt hier mit Hilfe von gelieferten 3D-Modellen.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse in einer Karte visualisiert. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Die kristallinen Gesteine Sachsens gehören zur Saxothurinischen Zone des Böhmisches Massivs nach der klassischen Zonengliederung des Variszikums (Kossmat 1927).

Sachsen besitzt eine Vielzahl an kristallinen Wirtsgesteine aus unterschiedlichen Erdzeitaltern. Die endlagerrelevanten Metamorphite und Plutonite lassen sich grundsätzlich in drei Gruppen zusammenfassen; (i) kristalline Gesteinseinheiten, die in der cadomischen Orogenese im Neoproterozoikum (ca. 580 – 540 Ma) entstanden sind, (ii) Granite und Edukte von variszischen Metamorphiten, die im Ordovizium (ca. 485 – 460 Ma) gebildet wurden und (iii) Metamorphite und Granite die während oder nach der variszischen Orogenese im Oberkarbon und Perm (ca. 340 – 280 Ma) entstanden sind.

Eine tabellarische Übersicht der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten in Sachsen mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der Inventarisierungstabelle (BGE 2020l) zu finden.

Lausitzer Block

Der Lausitzer Block ist eine tektonische Großeinheit im östlichen Sachsen, die in Richtung Südwesten von der Elbezone durch die Lausitzer Überschiebung begrenzt ist. Das Besondere ist, dass der Lausitzer Block wohl die einzige präkambrische Einheit in den deutschen Varisziden ist, die kaum variszische Metamorphose (von 390 – 340 Ma) erfahren hat, und so seit 540 Millionen Jahren einen halbwegs stabilen Krustenblock darstellt. Bei der variszischen Orogenese wurde der Lausitzer Block als mächtige cadomische Kruste nicht subduziert und deformiert (Kroner & Romer 2013).

Die kristallinen Wirtsgesteine im Lausitzer Block sind mehrere Kilometer mächtige cadomische Granodiorite (genau genommen eine magmatische Suite aus drei Granodiorit-Typen: (i) Zweiglimmer-Granodiorite der ersten Phase, sogenannte „Anatexite“, (ii) Muskovit- und Biotit-führende Granodiorite bis Tonalite und (iii) Biotit-führende Granodiorite)

sowie jüngere Granite wie der Rumburker Granit (Ordovizium) und Granite, die im Anschluss an die variszische Orogenese entstanden sind, wie z. B. der Stolpener und Königshainer Granit (Berger et al. 2011; Linnemann et al. 2007). In der Frühphase der variszischen Orogenese intrudierten im Oberdevon (ca. 385 – 375 Ma) geringmächtige (< 100 m), Westnordwest-Ostsüdost streichende Gabbrodiorite und Gabbros im Lausitzer Block (Járóka et al. 2019). Diese mafischen Intrusionen nutzten transtensionale Strike-slip-Störungssysteme im Lausitzer Block im Back-arc-Bereich einer variszischen Südwest-gerichteten Subduktion im Bereich der heutigen Sudeten (Kroner & Romer 2013; Stephan et al. 2016).

Die jüngsten magmatischen Gesteine im südlichen Lausitzer Block sind Vulkanite (alkaliner Trend von Olivinnepheliniten und Basaniten zu Trachyten und Phonoliten) des tertiären Lausitzer Vulkanitgebiets (ca. 35 – 27 Ma) an der Grenze zur Tschechischen Republik (Büchner et al. 2015). Letztere sind jedoch keine endlagerrelevanten kristallinen Wirtsgesteine.

Metamorphite im Erzgebirge und Vogtland

Die kristallinen Wirtsgesteine des Erzgebirges entstanden während der europäischen variszischen Gebirgsbildung, bei der der damalige Nordkontinent (Laurasia), bestehend aus Laurentia, Baltica und Avalonia, mit dem Südkontinent (Gondwana) kollidiert ist (Kroner & Romer 2013; Sebastian 2013). Das Erzgebirge gehört zur Saxothuringischen Zone des Böhmisches Massivs (Kossmat 1927) und besteht überwiegend aus variszischen Metamorphiten, wie Gneisen und Glimmerschiefern, sowie Graniten aus dem Oberkarbon und Perm. Im Erzgebirge und Vogtland finden sich jedoch auch niedrigmetamorphe Gesteine wie Phyllite und Schiefer. Diese Schiefergebirge; wozu v. a. das Thüringisch-Vogtländische Schiefergebirge, das Frankenger Zwischengebirge, und das Nossen-Wilsdruffer-Schiefergebirge zählen (Sebastian 2013), umgeben das hochgradig regionalmetamorphe Kerngebiet des Erzgebirges. Das Erzgebirge wird im Osten durch Störungen zur Elbezone begrenzt und ist nach Süden durch den känozoischen Erzgebirgsabbruch definiert (Sebastian 2013).

Eine aktuelle tektonisch-metamorphe Gliederung der erzgebirgischen Metamorphite ist in Rötzer & Plessen (2010) zu finden. Die großflächigen und mehrere Kilometer mächtigen Orthogneise von Freiberg (Graugneis) und Reitzenhain (Rotgneis) werden jeweils als ehemalige cadomische Granodioritintrusionen, ähnlich denen im Lausitzer Block, sowie ordovizische Granitintrusionen angesehen (Kroner et al. 1995; Tichomirowa et al. 2012). Die äußeren Freiberg Graugneise im Osterzgebirge und Paragneise im Westerbirge werden anhand ihrer Zirkonpopulationen als regionalmetamorphe Äquivalente der cadomischen Grauwackensequenzen interpretiert (Tichomirowa et al. 2012).

Die stark verfalteten Muskovitgneise (Phengitgneise) der tektono-metamorphen Gneis-Eklogit-Einheit im mittleren Erzgebirge sind aus ordovizischen Einheiten entstanden, und in diesen metamorphen Hochdruck-Hochtemperatur-Einheiten (HP-HT) finden sich auch Amphibolite, Eklogite, Serpentinite und Granulite, die zu den UHP-Einheiten

($p > 30$ kbar) im Erzgebirge gehören (Rötzler & Plessen 2010; Sebastian 2013). Die sa-xothurinischen Metamorphite erfuhren ihre Hauptmetamorphose (Peak-Metamorphose-Bedingungen) alle bei ca. 340 Ma; Abkühlungsalter belegen eine Stapelung und Exhumierung aller tektonischen Einheiten bei 330 Ma (Kroner & Görz 2010).

Granulitkomplex

Der sächsische Granulitkomplex ist eine kristalline Gesteinsformation, die sehr hohe Drücke (circa 22 kbar) und Temperaturen von mehr als 1000 °C (UHT) während der variszischen Metamorphose (340 Ma) erfahren hat (Romer & Rötzler 2001). Bei der Exhumierung der heißen granulitfaziellen Gesteine aus den tieferen Krustenbereichen mit einer Geschwindigkeit von mehr als 9 – 18 mm pro Jahr kam es zu Kontaktmetamorphosen in den umgebenden Schiefereinheiten (Kroner 1995; Kroner & Romer 2013; Romer & Rötzler 2001; Rötzler & Romer 2001). Der Granulit selbst wird petrologisch von felsischem Granulit (Granat-Disthen-Granulit) dominiert; in einigen Bereichen findet sich jedoch auch mafischer Granat-Pyroxen-Granulit (Rötzler & Romer 2001). Eine Reihe von verschiedenen syntektonischen Monzograniten sind in den Granulitkomplex während oder kurz nach der variszischen Peak-Metamorphose intrudiert (Förster et al. 2011; von Quadt 1993).

Plutonite in der Elbezone

Der Plutonitkomplex von Meißen in der Elbezone besteht aus einer magmatischen Differentiationsabfolge von mafischen Dioriten und Monzoniten bis hin zu Granodioriten und quarzreicheren Graniten. Die Plutonite intrudierten im Zuge von dextralen Scherbewegungen in der Elbezone im Zeitraum von 330 – 327 Ma (Sebastian 2013; Wenzel et al. 1997). Die Spurenelementgeochemie der mafischen Diorite zeigt, dass die Ausgangsschmelzen für den Meißener Plutonitkomplex aus dem subkontinentalen lithosphärischen Mantel (SCLM) stammen (Wenzel et al. 1997).

Granite des Erzgebirges

Die postkollisionalen Granite im Erzgebirge (also die nach der Hauptphase der variszischen Gebirgsbildung entstandenen Granite) lassen sich nach Förster et al. (1999) in folgende geochemische Typen gliedern:

- F-arme Biotit-Granite (Typ Kirchberg); charakteristisch sind Mg-reicher Biotit in den älteren, grobkörnigen Einheiten und Fe-reicher Biotit in den jüngeren Einheiten; Amphibol nur im ältesten, dem Niederbobritzscher Granit; zur Gruppe dieser Granite gehören Kirchberg, Burkersdorf, Aue/Schlema-Alberoda, Schneeberg, Auerhammer, Beierfeld, Bernsbach und Niederbobritzsch (Förster et al. 2011; Förster et al. 1999)
- F-arme Zweiglimmer-Granite (Typ Bergen); charakteristisch sind Fe-reicher Biotit und Siderophyllit sowie Muskovit; zur Gruppe dieser Granite gehören Bergen, Schwarzenberg, Erla und Lauter (Förster et al. 2011; Förster et al. 1999)
- F-reiche, P-reiche Lithiumglimmer-Granite (Typ Eibenstock); charakteristisch sind mehrere Quarz-Generationen sowie Anorthit-arter Plagioklas und Perthit-

reicher Kalifeldspat; zur Gruppe dieser Granite gehören Eibenstock, Ehrenfriedersdorf, Greifensteine, Geyer, Wiesenbad, Ziegelberg, Buchholz, Annaberg, Satzung, und Pobershau (Förster et al. 2011; Förster et al. 1999)

- F-reiche, P-arme Lithiumglimmer-Granite (Typ Schellerhau); charakteristisch sind Li-reicher Annit oder Siderophyllit und Zinnwaldit (Polyolithionit-Siderophyllit Reihe), albitreiche Plagioklase, Fluorit und Topas; zur Gruppe dieser Granite gehören Schellerhau, Sadisdorf, Altenberg, Hegelshöhe, Schenkenshöhe, Sachsenhöhe, Zinnwald, Seiffen, und Markersbach (Förster et al. 2011; Förster et al. 1999)
- F-angereicherte, P-arme Biotit-Granite (Typ Gottesberg); charakteristisch ist Siderophyllit als Glimmer; zur Gruppe dieser Granite gehören Gottesberg, Eichigt und Schönbrunn (Förster et al. 2011; Förster et al. 1999)

Die großvolumigen Granitplutone des Erzgebirges sind allesamt Ilmenit-Serien-Granite (Ishihara 1977) und können geochemisch, bis auf den Niederbobritzscher Granit, als S- oder A-Typ Granite angesprochen werden (Chappell & White 1974; Förster et al. 1999). Die allermeisten Granitplutone intrudierten zwischen 327 Ma und 314 Ma (Romer et al. 2007; Tichomirowa et al. 2019). Für einige Intrusionen, z. B. die Granitintrusionen innerhalb der Altenberg-Teplice-Caldera, den Granit von Seiffen oder den verdeckten Granit von Eichigt-Schönbrunn im Vogtland, werden auch deutlich jüngere Intrusionsalter berichtet (Förster & Rhede 2006; Gottesmann et al. 2017; Tomek et al. 2019).

Plutonite in Nordsachsen

Der variszischen Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin liegt in den Bundesländern Sachsen-Anhalt, Brandenburg und zu einem kleinen Teil in Sachsen und besteht überwiegend aus Biotit-Granodioriten, Amphibol-führenden Biotit-Granodioriten, Dioriten, Tonaliten und Gabbros (Kopp et al. 2001). Der größte Pluton in Nordsachsen ist der ultramafische Plutonitkomplex von Delitzsch, der in der Kreide intrudiert ist (Seifert et al. 2000).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 260). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 260: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Datei-gruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
2	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	DGM10_dyn_mesh_tol10	Digitales-Gelände-Modell
3	SN	LfULG	11839344_003/885	ts	13_2_Aue\3D_Daten	3D-Modell „„Vorzugsgebiet Aue““
4	SN	LfULG	11839344_003/859	ts	06_Rohsa_3.1	3D-Modell „ROHSA 3.1“
5	SN	LfULG	11839344_003/883	ts	13_1_Anna-berg\3D_Daten	3D-Modell „An-naberg-Buch-holz“
6	SN	LfULG	11839344_003/867	ts	09_ATC\3D_Daten	3D-Modell „Al-tenberg-Teplice-Caldera“
7	SN	LfULG	11839344_003/852	ts	04_0_Elbe-zone\3D_Daten	3D-Modell „Vor-zugsgebiet El-bezone“
8	SN	LfULG	11839344_003/877	ts	12_1_Zittau\3D_Daten	3D-Modell „Zittauer Be-cken“

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Kristallins in Sachsen geprüft wurde, ist in Tabelle 261 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 261: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™); Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1300 m (DGM_-1300m) absenken	<i>DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1300.ts</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Angleichen der sich überlappenden Grundgebirgsflächen der einzelnen Modelle	
c) Bearbeitungsfläche erzeugen: aus allen Grundgebirgsflächen eine Fläche erstellen	<i>SN_K_merged.ts</i>
d) Zuschneiden der Bearbeitungsfläche auf die Landesgrenze Sachsens	<i>SN_K_cutborders.ts</i>
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1300 m u. GOK liegen, ausschneiden und löschen	<i>SN_K_1300m.ts</i>
f) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, auf -300 m u. GOK herabsenken	<i>SN_K_1300_300.ts</i>
g) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	<i>SN_K_1300_300_qs.ts</i>
h) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Export der Kurven zur Weiterbearbeitung in 2D	
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	<i>MG_K_SN.dxf</i>
2. 2D-Bearbeitung mit ArcMap	
a) Überführen der DXF-Datei in ArcMap	
b) Ermitteln zusammenhängender Polygone und deren Gesamtflächen	<i>SN_IG.shp</i>
c) Abdeckung des 3D-Modells (ohne Filter) als Polygon-Shape	<i>SN_UmrissClip.shp</i>
d) Überführen der ASCII-Datei in ArcMap	<i>SN_PktGOK_OID.shp</i>
e) Filter der Höhenpunkte auf 300-1300 u. GOK	<i>SN_PktGOK_filter.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 261 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Die Bearbeitungsfläche wurden aus Grundgebirgsflächen von sechs verschiedenen Modellen zusammengesetzt.

Das Modell „Vorzugsgebiet Aue“ wurde im Zuge des Projektes „Tiefengeothermie Sachsen“ des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) des Freistaats Sachsen erstellt. Es beinhaltet 6 stratigraphische Einheiten (von Aue Granit bis zur Niederschlag-Keilberg-Gruppe) sowie eine Topographiefläche. Das Modell betrachtet die Gera-Jáchymov-Zone im Raum Aue-Schwarzenberg-Zwickau. Folgende Flächen wurden modelliert:

- 01_Aue_Niederschlag-Keilberg_Grp = Niederschlag-Keilberg Gruppe
- 02_Aue_Niederschlag-Joachimathal_Grp = Niederschlag-Joachimsthaler Gruppe
- 03_Aue_Thummer_Grp = Thumer Gruppe
- 04_Aue_Silur-Devon = Silur und Devon
- 05_Aue_Frauenbach-Phycoden_Grp = Frauenbach und Phycoden Gruppe
- 06_Aue_Granit = Granite

Das Modell „ROHSA 3.1“ wurde vom Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) zur Untersuchung von potentiell lagerstättenrelevanten Mineralisationszonen erstellt und beinhaltet 8 stratigraphische Einheiten (vom Granit Typ Bergen bis zum Neoproterozoikum) als Topflächen und eine Topographiefläche. Das Modell betrachtet Gebiete im mittleren Erzgebirge zwischen Thum, Schwarzenberg, Tannenberg und Zwönitz. Folgende Flächen wurden modelliert:

- 08_GEY_001_TOP_Neoproterozoikum = Neoproterozoikum
- 08_GEY_002_TOP_Klinovec = Klinovec-Gruppe
- 08_GEY_003_TOP_Jachymov = Jáchymov-Gruppe
- 08_GEY_004_TOP_Thum = Thum-Gruppe
- 08_GEY_005_TOP_Frauenbach = Frauenbach-Gruppe
- ts_09_GEY_006_061_TOP_Granit_Typ_Eibenstock_mit_Ausstrich = Granit Typ Eibenstock
- ts_09_GEY_006_062_TOP_Granit_Typ_Bergen = Granit Typ Bergen
- ts_09_GEY_006_063_TOP_Granit_Typ_Kirchberg = Granit Typ Kirchberg

Das Modell „Annaberg-Buchholz“ wurde zur Erkundung des geothermischen Potentials im Raum Annaberg durch das LfULG, die TU Bergakademie Freiberg und das GFZ Potsdam erstellt und beinhaltet 3 Volumenkörper und eine Topographie-Fläche. Das Modell betrachtet den Raum Annaberg. Folgende Volumenkörper wurden modelliert:

- ts_ANA_Geol_Glimmerschiefer_orig = Volumen Glimmerschiefer
- ts_ANA_Geol_Gneis_orig = Volumen Gneis
- ts_ANA_Geol_Granit_orig = Volumen Granit

Das Modell „Altenberg-Teplice-Caldera“ wurde im vom LfULG und dem geologischen Dienst Tschechiens erstellt und beinhaltet 11 Tophorizonte und eine Topographie-Fläche. Das Modell betrachtet grenzübergreifend die Altenberg-Teplice-Caldera im östlichen Erzgebirge Deutschlands und Tschechiens. Folgende Topflächen wurden modelliert:

- ts_12_ATCa_12_002_Gneis_Top = Gneise
- ts_12_ATCa_10_002_Phyllit_Top = Phyllite/Metabasite
- ts_12_ATCa_09_002_Granit_Flaje_Top = Biotitgranite von Flaje
- ts_12_ATCa_08_002_Schoenfeld_Top = Schönfeld Einheit
- ts_12_ATCa_09_004_Teplice_Rhyolith_Top = Teplice-Rhyolith
- ts_12_ATCa_09_007_Granitporphyr_Altenberg_Top = Microgranit / Granitporphyr von Altenberg / Frauenstein
- ts_12_ATCa_09_008_LG_Granit_Schellerhau = Lithium-Glimmer-Granit von Schellerhau-Sadisdorf
- ts_12_ATCa_09_010_Gaenge_Sayda_Top = Gangschwarm von Sayda-Berggießhübel
- ts_12_ATCa_13_001_Versteckter_Granit = Versteckter Granit unter Teplice Rhyolith
- ts_12_ATCa_12_003_Kristallin = Kristallin Tschechien
- ts_12_ATCa_05_999_Kreide_Top = Kreidesedimente

Das Modell „Vorzugsgebiet Elbezone“ wurde im Zuge des Projektes „Tiefengeothermie Sachsen“ des Landesamtes für Umweltschutz, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) des Freistaats Sachsen erstellt. Es beinhaltet 14 geologische Körper. Das Modell betrachtet im Raum Meißen/Dresden/Pirna Areale mit Monzoniten/Dioriten/Granodioriten mit tiefreichender Tektonik. Folgende Körper wurden modelliert:

- ts_05_Elbz_05_001_Kreide
- ts_05_Elbz_08_001_Doehlener_Becken
- ts_05_Elbz_11_001_Elbtal-Schiefergebirge
- ts_05_Elbz_12_001_Gneise
- ts_05_Elbz_12_002_Osterzgebirge
- ts_05_Elbz_13_001_Riesenstein-Granit
- ts_05_Elbz_13_002_Markersbacher_Granit
- ts_05_Elbz_13_003_Stolpener_Granit
- ts_05_Elbz_13_004_Prophyrite
- ts_05_Elbz_13_005_Diorite

- ts_05_Elbz_13_006_Hauptgranit
- ts_05_Elbz_13_007_Monzonit
- ts_05_Elbz_13_008_Monzodiorit
- ts_05_Elbz_13_009_Lausitzer_Granodiorit

Das Modell „Zittauer Becken“ wurde vom Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) des Freistaats Sachsen erstellt. Es beinhaltet 10 geologische Flächen und eine Topographiefäche. Das Modell betrachtet das Becken von Zittau-Turow-Hardek zur Veranschaulichung der zeitlichen Entwicklung des Tertiärbeckens. Folgende Flächen wurden modelliert:

- ts_13_Zit_02_000_Qu = Quartär, Unterkante
- ts_13_Zit_03_003_FL3 = Zittauer Oberflözkomplex, Oberkante
- ts_13_Zit_03_004_FL3 = Zittauer Oberflözkomplex, Unterkante
- ts_13_Zit_03_001_FL2 = Zittauer Unterflözkomplex, Oberkante
- ts_13_Zit_03_002_FL2 = Zittauer Unterflözkomplex, Unterkante
- ts_13_Zit_03_000_ST = Sedimentäres Tertiär, Unterkante
- ts_13_Zit_04_000_Vulk = Magmatisches Tertiär, Oberkante
- ts_13_Zit_04_999_Vulk = Magmatisches Tertär, Unterkante
- ts_13_Zit_30_999_PraeT = Prätertiär, Oberkante
- ts_13_Zit_12_999_Gr = Granitoide Gesteine, Oberkante

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 261 schrittweise beschrieben. Die Modellierschritte, die Qualitätskontrolle durch die Prüfung der statistischen Werte sowie Lage und Richtigkeit durch Profilschnitte erfolgte manuell.

Als Basisflächen für die Bearbeitungsfläche dienten folgende Flächen, die jeweils das Top des Grundgebirges darstellen:

- „06_Aue_Granit“ aus dem Modell „„Vorzugsgebiet Aue““
- „08_GEY_001_TOP_Neoproterozoikum“, „08_GEY_002_TOP_Klinovec“, „08_GEY_003_TOP_Jachymov“, „ts_09_GEY_006_061_TOP_Granit_Typ_Eibenstock_mit_Ausstrich“, „ts_09_GEY_006_062_TOP_Granit_Typ_Bergen“ und „ts_09_GEY_006_063_TOP_Granit_Typ_Kirchberg“ aus dem Modell „ROHSA 3.1“
- „ts_ANA_Geol_Gneis_orig“ und „ts_ANA_Geol_Granit_orig“ aus dem Modell „Annaberg-Buchholz“
- „ts_12_ATCa_12_002_Gneis_Top“, „ts_12_ATCa_09_002_Granit_Flaje_Top“, „ts_12_ATCa_09_007_Granitporphyr_Altenberg_Top“ und

„ts_12_ATCa_09_008_LG_Granit_Schellerhau“ aus dem Modell „Altenberg-Teplice-Caldera“

- „ts_05_Elbz_12_001_Gneise“, „ts_05_Elbz_12_002_Osterzgebirge“, „ts_05_Elbz_13_001_Riesenstein-Granit“, „ts_05_Elbz_13_002_Markersbacher_Granit“, „ts_05_Elbz_13_003_Stolpener_Granit“, „ts_05_Elbz_13_004_Prophyrite“, „ts_05_Elbz_13_005_Diorite“, „ts_05_Elbz_13_006_Hauptgranit“, „ts_05_Elbz_13_007_Monzonit“, „ts_05_Elbz_13_008_Monzodiorit“ und „ts_05_Elbz_13_009_Lausitzer_Granodiorit“ aus dem Modell „Vorzugsgebiet Elbezone“
- „ts_13_Zit_12_999_Gr“ aus dem Modell „Zittauer Becken“

Das Digitale Geländemodell für Sachsen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1300 m in die Tiefe versetzt (vgl. Tabelle 261, Arbeitsschritt 1a).

Die Grundgebirgsflächen der einzelnen Modelle wurden zu einem Bearbeitungshorizont zusammengefügt. Der Bearbeitungshorizont wurde dann auf die Landesgrenzen Sachsens zugeschnitten, die Gebiete außerhalb Sachsens entfernt (Tabelle 261, 1b – 1d).

Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden auf 300 m u. GOK herabgesetzt (Tabelle 261, 1e und 1f).

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (endlagerrelevante Tiefe 300 m – 1300 m u. GOK) eingehalten werden (Tabelle 261, 1g).

In dem Bearbeitungsgebiet liegen aktive Störungszonen mit Sicherheitsabständen. Die Bearbeitung im 3D-Modell erfolgt nur für diejenigen Störungszonen deren Einfallen nicht vertikal verläuft. Aus dem Verschnitt der Sicherheitsabstände mit der Bearbeitungsfläche wurde eine Kurve erzeugt mit der die Bearbeitungsfläche verschnitten wurde. Der Abstand der Bearbeitungsfläche zu den Störungsflächen wurde berechnet und eine automatisierte Auswahl der Bereiche innerhalb der Ausschlussgebiete generiert (Tabelle 261, 1h). Diese Ausschlussbereiche wurden im DXF-Format für die länderübergreifende Weiterbearbeitung exportiert (BGE 2020j).

2D-Bearbeitung

Das vorgefilterte 3D-Modell wurde für die Bearbeitung in ArcMap als DXF-Format exportiert. Damit die Daten in den Funktionen und Berechnungen in ArcMap verwendet werden können, müssen sie entsprechend von DXF-Files in Shape-Files überführt werden (Funktion: CAD in Geodatabase; Tabelle 261, 2a). Diese Funktion erzeugt 3 Shapes (Multipatch, Polygon, Polyline). Für die weitere Bearbeitung wird das Polygon-Shape verwendet.

Durch die Vorab-Filterung in der 3D-Bearbeitung und die notwendigen Formatübertragungen entstehen „Null-Flächen“, also Polygone, die eine Fläche von „0“ besitzen und somit von ArcMap als fehlerhaft erkannt werden.

Diese Flächen müssen herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Danach werden die Massen von Einzel-Polygonen in jeweils zusammenhängende Flächen verschmolzen (Funktion: Dissolve; Tabelle 261, 2b).

Das 3D-Modell von Sachsen besteht aus etlichen einzelnen Modellen, deren Umriss als Linien-Shapes zur Verfügung gestellt wurden. Diese 6 Shapes werden mit der Funktion „Feature in Polygon“ zu einer großen Polygon-Shape zusammengeführt. Hier ist zu beachten, dass die Modellabdeckung über die Grenze von Deutschland hinausgeht und das Umrisspolygon demnach vor der Weiterverarbeitung ausgeschnitten werden muss (Funktion: Ausschneiden; Tabelle 261, 2c).

Parallel zur DXF-Datei wurde in der 3D-Bearbeitung eine ASCII-Datei erzeugt, die alle Knotenpunkte mit jeweiliger NN- und u. GOK-Höhe enthält. Aus diesem Datensatz wird ein temporärer Punkt-Layer erzeugt (Funktion: XY-Ereignis-Layer erstellen), indem X- und Y-Spalten aus der Tabelle ausgewählt werden. Um diesen Punkt-Layer in Berechnungen verwenden zu können, muss dieser zuerst in eine neue Feature Class überführt werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Durch den Prozess des Filterns und Zuschneidens anhand der Auswahlkriterien wurden jedoch Randpunkte erzeugt, die außerhalb der Auswahlkriterien liegen.

Um diese rechnerisch entstandenen Elemente zu entfernen, werden von allen Punktdaten jeweils nur die Punkte, die einen Wert unter GOK von 290-1310 besitzen (10-m-Puffer), gefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class; vgl. Tabelle 261, 2e).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

„In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen; sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann;“

Die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG wird entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, denn im jetzigen Detaillierungsgrad ist eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll.

Begründung aus dem StandAG für diese Verfahrensweise:

„Sofern für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt,

soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.“ (§ 23 Abs. 3 StandAG)

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestmächtigkeit des Kristallins in Sachsen wurde anhand der 3D-Modelle unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Informationen aus der Inventarisierungstabelle für das kristalline Wirtsgestein (BGE 2020I), der GÜK200 und Daten aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungsdaten der Bundesländer wurden zusätzlich herangezogen um die Mindestmächtigkeit der ermittelten Gebiete für das kristalline Wirtsgestein zu verifizieren.

Inklusive des einzurechnenden Sicherheitsabstands von 100 m zum Einlagerungsbereich in kristallinem Wirtsgestein (DBE TEC 2016), der als horizontaler als auch vertikaler Sicherheitsabstand eingehalten werden sollte, wird eine Mindestmächtigkeit von 200 m angesetzt. Diese 200 m Mächtigkeit ergeben sich aus 100 m Sicherheitsabstand im Hangenden und 100 m Mindestmächtigkeit des Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG). Da die maximale Suchteufe nach derzeitigem Stand auf 1500 m u. GOK festgelegt wurde, muss sich die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges im Sinne der Endlagerung von HAW auf einem Höhenniveau von 1300 m u. GOK oder höher befinden.

Von diesem Vorgehen unbeeinflusst bleibt die Möglichkeit innerhalb des kristallinen Gebirgsbereichs, gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, einen homogenen Gesteinskörper des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit (z. B. durch das Vorkommen von magmatischen Ganggesteinen oder Restriktionen durch das vorherrschende Trennflächengefüge) über den Nachweis des sicheren Einschlusses auch über das Zusammenwirken des kristallinen Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren zu führen.

Nur wenige der gelieferten geologischen 3D-Modelle der SGD beinhalten eine detaillierte volumenbezogene geologische 3D-Modellierung der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten mit zusätzlichen Informationen wie z.B. Gesteinstyp, Alter, und tektonische Position. Die kleinräumigen 3D-Modelle von Sachsen bilden hier eine erfreuliche Ausnahme. Auch wenn es kein bundeslandeseitiges 3D-Modell von Sachsen gibt. Im Allgemeinen weisen die geologischen 3D-Landesmodelle lediglich, falls vorhanden, eine Topfläche des kristallinen Grundgebirges aus. Da das kristalline Grundgebirge gewöhnlich die älteste liegende geologische Einheit bildet, wird bei der Ausweisung von identifizierten Gebieten des Wirtsgesteins Kristallin nicht mit einem Basishorizont gearbeitet. Nur in einigen wenigen bekannten Fällen liegen hochgradig regionalmetamorphe Gesteine und darin enthaltene Plutonite als tektonische Decken im Hangenden von niedrigmetamorphen Gesteinseinheiten oder Sedimenten.

Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für kristallines Wirtsgestein wird ein Flächenbedarf von mindestens 6 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Flächen mit geringerer Ausbreitung, wie bspw. kleinere Intrusionen, werden gelöscht. Die Anwendung der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ erfolgt in ArcMAP in 2D. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen sind Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden. Der Flächenbedarf wird nach der Ausweisung der Identifizierten Gebiete erneut geprüft. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

„Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.“

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 126 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten aus den 3D-Modellen (SKUA-GOCAD) zu den Mindestanforderungen für das kristalline Wirtsgestein in Sachsen dargestellt. Die Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem Protokoll zur **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** dargestellt.

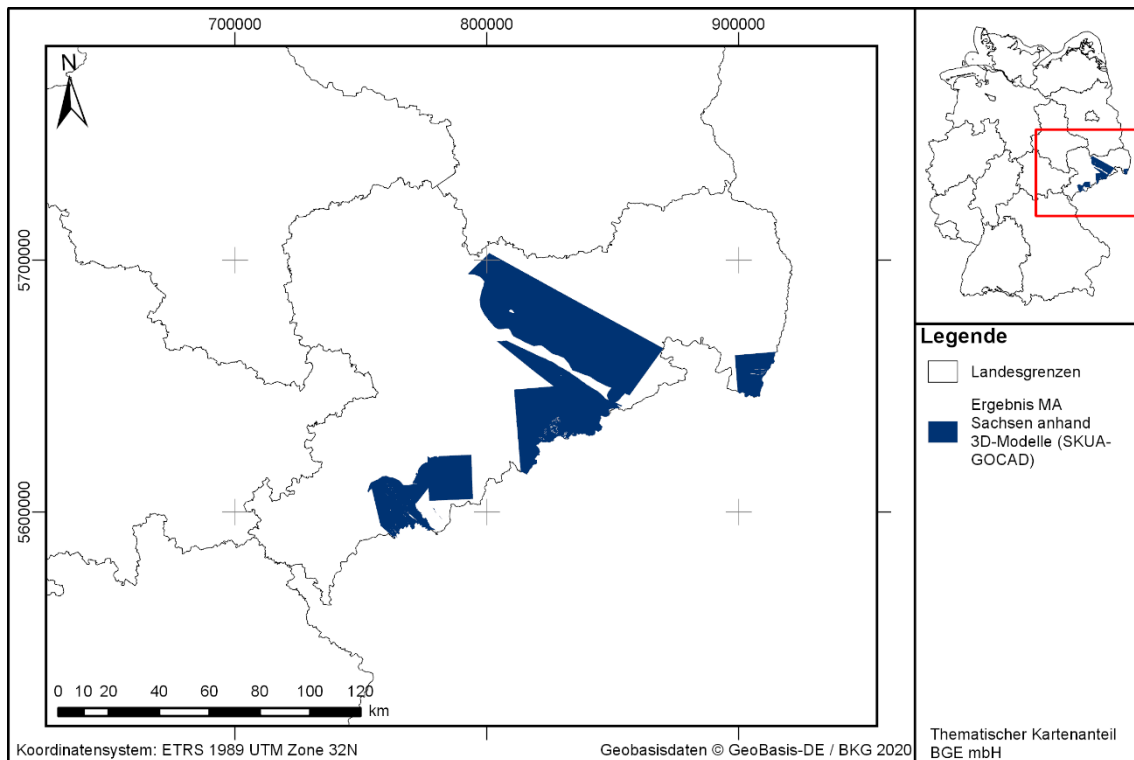


Abbildung 126: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Sachsen anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 262 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 262: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten

DokID	Dateigruppe	Dateiname	Beschreibung
11839344_003	885	13_2_Aue\3D_Daten	3D-Modell „Vorzugsgebiet Aue“
11839344_003	859	\06_Rohsa_3.1\3D_Daten\	3D-Modell „ROHSA 3.1“
11839344_003	883	13_1_Annaberg\3D_Daten	3D-Modell „Annaberg-Buchholz“
11839344_003	867	09_ATC\3D_Daten	3D-Modell „Altenberg-Teplice-Caldera“
11839344_003	852	04_0_Elbezone\3D_Daten	3D-Modell „Vorzugsgebiet Elbezone“
11839344_003	877	12_1_Zittau\3D_Daten	3D-Modell „Zittauer Becken“

1.4.8 Thüringen (TH)

Einleitung und Zielsetzung

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für das Wirtsgestein Kristallin. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in diesem Protokoll auf das Verbreitungsgebiet im Bundesland Thüringen. Die Anwendung der Mindestanforderungen (Mächtigkeit und Tiefenlage) erfolgt mit Hilfe eines landesweiten 3D-Modells.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Anwendung der Mindestanforderungen basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse visualisiert. Ziel der Bearbeitung ist die Ausweisung von Gebieten in Thüringen, die die Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden im Anschluss an die Anwendung der Ausschlusskriterien bei einer **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** verwendet, um identifizierte Gebiete auszuweisen. Danach erfolgt eine Geowissenschaftliche Abwägung und die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, die in einem separaten Dokument (BGE 2020k) beschrieben wird.

Geologischer Überblick

Eine tabellarische Übersicht der kristallinen Wirtsgesteinseinheiten in Thüringen mit einer Beschreibung der jeweiligen lithologischen Ausbildung ist in der Inventarisierungstabelle (Kapitel 5) zu finden.

Kristallines Wirtsgestein findet sich in Thüringen an oberflächlichen Aufschlüssen im Thüringer Wald in Form des Ruhlaer Kristallins und des Thüringer Hauptgranits, sowie im Kyffhäuser Kristallin im Norden Thüringens. Im tieferen geologischen Untergrund des Thüringer Beckens wurde durch Bohrungen in den 1950er und 1960er Jahren unter mesozoischer Überdeckung ebenfalls kristallines Wirtsgestein nachgewiesen (Seidel 2003). Die kristallinen Wirtsgesteine in Thüringen gehören zur Mitteldeutschen Kristallinzone (MKZ). Die MKZ besteht aus variszischen Kristallingesteinen, die in deutschen Mittelgebirgsregionen oberflächlich aufgeschlossen sind (Zeh & Will 2008) und sich im tieferen Untergrund Thüringens, Sachsen-Anhalts und Brandenburgs bis zur östlichen deutschen Landesgrenze fortsetzt (Kopp et al. 2001).

Das Ruhlaer Kristallin bildet einen ca. 100 km² großen oberflächlichen Aufschluss von metamorphen und magmatischen Gesteinen und besteht aus vier tektonisch-metamorphen Einheiten: (i) der Trusetal-Gruppe (Glimmerschiefer und Gneise), (ii) der Ruhla-Gruppe (Gneise), (iii) der Botterode Gruppe (migmatitische Gneise), und (iv) der Zentralgneis-Einheit (Wunderlich & Zeh 2001b; Zeh & Will 2008). Variszische und permische Plutone, z. B. der Thüringer Hauptgranit mit 337 ± 4 Ma, der Trusetal-Granit mit 298 ± 2 Ma und der Ruhlaer Granit mit 295 ± 3 Ma, intrudierten in diese variszischen metamorphen Einheiten (Brätz 2000; Wunderlich & Zeh 2001b; Zeh & Brätz 2002; Zeh & Will 2008).

Das Kyffhäuser-Kristallin bildet einen sehr kleinen (nur wenige Quadratkilometer) Aufschluss an der Oberfläche, setzt sich aber unter geringmächtiger sedimentärer Überdeckung nach Süden hin fort. Es lässt sich in drei Einheiten gliedern: (i) den magmatisch-metamorphen Komplex (Gabbros und Gneise) im Westen, (ii) den Borntal-Komplex (Gneise) und (iii) den Bärenkopf-Granit im Osten (Wunderlich & Zeh 2001a; Zeh 1995; Zeh & Will 2008).

Kristalline Gesteine der MKZ, v. a. Gneise, Granodiorit- und Granit-Anatexite, sowie Granite, sind auch im Untergrund des Thüringer Beckens weit verbreitet. Die Gliederung des Kristallinen Grundgebirges des Thüringer Beckens wurde anhand von Tiefenbohrungen, Geophysik und der allgemeinen variszischen Zonengliederung nach Kossmat (1927) in geotektonische Einheiten vorgenommen (Wunderlich & Zeh 2001a).

Eingangsdaten

Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 263). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Sofern die Eingangsdaten in anderen Koordinatensystemen vorlagen, wurden diese entsprechend in das Zielkoordinatensystem transformiert.

Tabelle 263: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	TLUBN	11840020/ 912	ts	INFLUINS_Surfaces	3D-Modell Thüringen
3	DE	BKG	11875056/ 7727	ASCII	DGM10_dyn_mesh_ tol10	Digitales-Gelände-Modell

Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Vorgehensweise

Die Schrittfolge, mit der die Erfüllung der Mindestanforderungen Mächtigkeit, Tiefenlage und Flächenbedarf des Kristallin Thüringen geprüft wurde, ist in Tabelle 264 aufgelistet. Zudem werden die einzelnen methodischen Ansätze und deren Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 264: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Flächenbearbeitung mit Bearbeitungssoftware (SKUA-GOCAD™); Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1300 m (DGM_-1300m) absenken	<i>DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts;</i> <i>DGM10_dyn_mesh_tol10_1500.ts</i>
b) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1300 m u. GOK liegen, ausschneiden und löschen	<i>TH_K_1300m.ts</i>
c) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, auf -300 m u. GOK herabsenken	<i>TH_K_1300_300.ts</i>
d) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	
e) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	<i>TH_K_20200612.dxf</i> <i>TH_K_20200612.txt</i> <i>TH_K_outline.dxf</i>
2. 2D-Bearbeitung mit ArcGIS Desktop	
a) Überführen der DXF-Datei in ArcMap	
b) Ermitteln zusammenhängender Polygone und deren Gesamtflächen	<i>TH_IG.shp</i>
c) Abdeckung des 3D-Modells (ohne Filter) als Polygon-Shape	<i>TH_Umriss.shp</i>
d) Überführen der ASCII-Datei in ArcMap	<i>TH_PktGOK_OID.shp</i>
e) Filter der Höhenpunkte auf 300-1300 u. GOK	<i>TH_PktGOK_filter.shp</i>

Bearbeitung im 3D-Modell

Für die in Tabelle 264 beschriebene 3D-Bearbeitung wurde das Modellierprogramm SKUA-GOCAD™ und die Datenmanagementsoftware EPOS® der Firma Emerson Paradigm Holding LLC verwendet. Die verwendete Version war „Paradigm 18“ mit dem letzten Aktualisierungsstand vom 28.06.2018 (vgl. Kapitel 7.2 in BGE 2020j).

Das hier verwendete Grundmodell INFLUINS (Verbundprojekt „Integrierte Fluidynamik in Sedimentbecken“) wurde an der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) in den Jahren 2010 bis 2014 entwickelt. Es deckt das Thüringer Becken ab, welches Teile von Thüringen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt sowie Hessen umfasst

und enthält 12 modellierte Tophorizonte (Präfix OK) und zwei Basishorizonte (Präfix UK) vom Grundgebirge bis zum Känozoikum.

- UK_Kaenozoikum (Känozoikum)
- Jura
- OK_ko (O. Keuper)
- OK_kmSM (M. Keuper)
- OK_ku (U. Keuper)
- OK_moC (Ceratitenschichten)
- OK_moT (Trochitenkalk)
- OK_mm (M. Muschelkalk)
- OK_mu (U. Muschelkalk)
- Ok_so (O. Buntsandstein)
- OK_sm (M. Buntsandstein)
- OK_su (U. Buntsandstein)
- OK_z3AN_z7 (Zechstein)
- UK_z1CA_z1C (Basis Zechstein)
- OK_G (Grundgebirge)

Arbeitsschritte und resultierende Flächen sind in Tabelle 264 schrittweise beschrieben.

Als Basisflächen für die Bearbeitungsfläche diente die Fläche „OK_G“, die das Top des Grundgebirges darstellt

Das Digitale Geländemodell für Thüringen wurde eingeladen und jeweils eine Kopie um 300 m und 1300 m in die Tiefe versetzt. Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1300 m u. GOK liegen, wurden gelöscht. Die Bereiche der Bearbeitungsfläche, die oberhalb 300 m u. GOK liegen, wurden auf 300 m u. GOK herabgesetzt.

Für die anschließende Qualitätskontrolle der Bearbeitungsfläche wurde die berechnete Mächtigkeit und Tiefenlage anhand von Histogrammen überprüft und gewährleistet, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen (endlagerrelevante Tiefe 300-1300 m u. GOK) eingehalten werden.

2D-Bearbeitung

Das vorgefilterte 3D-Modell und dessen gesamter Abdeckungsbereich wurden für die Bearbeitung in ArcMap als DXF-Format exportiert. Damit die Daten in den Funktionen und Berechnungen in ArcMap verwendet werden können, müssen sie entsprechend von DXF-Files in Shape-Files überführt werden (Funktion: CAD in Geodatabase).

Diese Funktion erzeugt für das gefilterte 3D-Modell 3 Shapes (Multipatch, Polygon, Polyline). Für die weitere Bearbeitung wird das Polygon-Shape verwendet. Durch die

Vorab-Filterung in der 3D-Bearbeitung und die notwendigen Formatübertragungen entstehen „Null-Flächen“, also Polygone, die eine Fläche von „0“ besitzen und somit von ArcMap als fehlerhaft erkannt werden (siehe Arbeitsschritte in Tabelle 264).

Diese Flächen müssen herausgefiltert werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Danach werden die Massen von Einzel-Polygonen in jeweils zusammenhängende Flächen verschmolzen (Funktion: Dissolve).

Das DXF des Umrisses beinhaltet Polylinien. Da für ein Flächenbasiertes Ausschneiden Polygon-Shapes nötig sind, muss der Datensatz zuerst in Polygone umgeformt werden (Funktionen: Feature-Class in Feature-Class + Feature in Polygon).

Parallel zur DXF-Datei wurde in der 3D-Bearbeitung eine ASCII-Datei erzeugt, die alle Knotenpunkte mit jeweiliger NN- und u. GOK-Höhe enthält. Aus diesem Datensatz wird ein temporärer Punkt-Layer erzeugt (Funktion: XY-Ereignis-Layer erstellen), indem X- und Y-Spalten aus der Tabelle ausgewählt werden. Um diesen Punkt-Layer in Berechnungen verwenden zu können, muss dieser zuerst in eine neue Feature Class überführt werden (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Durch den Prozess des Filterns und Zuschneidens anhand der Auswahlkriterien wurden jedoch Randpunkte erzeugt, die außerhalb der Auswahlkriterien liegen.

Um diese rechnerisch entstandenen Elemente zu entfernen, werden von allen Punktdaten jeweils nur die Punkte, die einen Wert unter GOK von 290-1310 besitzen (10-m-Puffer), gefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 StandAG

Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (Nr. 1)

„In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen; sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann;“

Die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG wird entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, denn im jetzigen Detaillierungsgrad ist eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll.

Begründung aus dem StandAG für diese Verfahrensweise:

„Sofern für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt, soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.“ (§ 23 Abs. 3 StandAG)

Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr. 2)

Die Mindestmächtigkeit des Kristallins in Thüringen wurde anhand der 3D-Modelle unter Einbeziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Informationen aus der Inventarisierungstabelle für das kristalline Wirtsgestein (BGE 2020I), der GÜK200 und Daten aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungsdaten der Bundesländer wurden zusätzlich herangezogen um die Mindestmächtigkeit der ermittelten Gebiete für das kristalline Wirtsgestein zu verifizieren.

Inklusive des einzurechnenden Sicherheitsabstands von 100 m zum Einlagerungsbe- reich in kristallinem Wirtsgestein (DBE TEC 2016), der als horizontaler als auch vertikaler Sicherheitsabstand eingehalten werden sollte, wird eine Mindestmächtigkeit von 200 m angesetzt. Diese 200 m Mächtigkeit ergeben sich aus 100 m Sicherheitsabstand im Hangenden und 100 m Mindestmächtigkeit des Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG). Da die maximale Suchteufe nach derzeitigem Stand auf 1500 m u. GOK festgelegt wurde, muss sich die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges im Sinne der Endlage- rung von HAW auf einem Höhenniveau von 1300 m u. GOK oder höher befinden.

Von diesem Vorgehen unbeeinflusst bleibt die Möglichkeit innerhalb des kristallinen Ge- birgsbereichs, gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, einen homogenen Gesteinskörper des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit (z. B. durch das Vorkommen von magmatischen Ganggesteinen oder Restriktionen durch das vorherrschende Trennflä- chengefüge) über den Nachweis des sicheren Einschlusses auch über das Zusammen- wirken des kristallinen Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren zu führen.

Nur wenige der gelieferten geologischen 3D-Modelle der SGD beinhalten eine detail- lierte volumenbezogene geologische 3D-Modellierung der kristallinen Wirtsgesteinsein- heiten mit zusätzlichen Informationen wie z. B. Gesteinstyp, Alter, und tektonische Posi- tion. Im Allgemeinen weisen die geologischen 3D-Landesmodelle lediglich, falls vorhan- den, eine Topfläche des kristallinen Grundgebirges aus. Da das kristalline Grundgebirge gewöhnlich die älteste liegende geologische Einheit bildet, wird bei der Ausweisung von identifizierten Gebieten des Wirtsgesteins Kristallin nicht mit einem Basishorizont gear- beitet. Nur in einigen wenigen bekannten Fällen liegen hochgradig regionalmetamorphe Gesteine und darin enthaltene Plutonite als tektonische Decken im Hangenden von nied- rigmetamorphen Gesteinseinheiten oder Sedimenten.

Für die ermittelten Gebiete wird die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschluss- wirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (Nr 3)

Die Tiefenlage des Kristallins in Thüringen wurde anhand des 3D-Modells unter Einbe- ziehung des Digitalen Geländemodells geprüft. Nur die Bereiche unterhalb von 300 m u. GOK erfüllen die Mindestanforderung und wurden weiter berücksichtigt. Für die ermit- telten Gebiete wird die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Nr. 4)

Für kristallines Wirtsgestein wird ein Flächenbedarf von mindestens 6 km² angenommen (BT-Drs. 18/11398). Flächen mit geringerer Ausbreitung, wie bspw. kleinere Intrusionsstücke oder isolierte Gangintrusionen, werden gelöscht. Die Anwendung der Mindestanforderung „Flächenbedarf“ erfolgt in ArcMAP in 2D. Alle Flächen, die diese Anforderung nicht erfüllen wurden aus der 2D-Gesamtfläche entfernt, ausgenommen sind Flächen, die über Bundeslandgrenzen hinweg fortgesetzt werden können. Der Flächenbedarf wird nach der Ausweisung der identifizierten Gebiete erneut geprüft. Für die verbleibenden Gebiete wird die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ daher als **erfüllt** eingestuft.

Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ (Nr. 5)

„Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.“

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als **erfüllt** angesehen.

Ergebnis

In Abbildung 127 ist das Ergebnis der Bearbeitung der Daten aus dem 3D-Modell „IN-FLUINS“ (SKUA-GOCAD) zu den Mindestanforderungen für das kristalline Wirtsgestein in Thüringen dargestellt. Die Ausweisung der identifizierten Gebiete ist einem Protokoll zur **bundeslandübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen (BGE 2020j)** dargestellt.

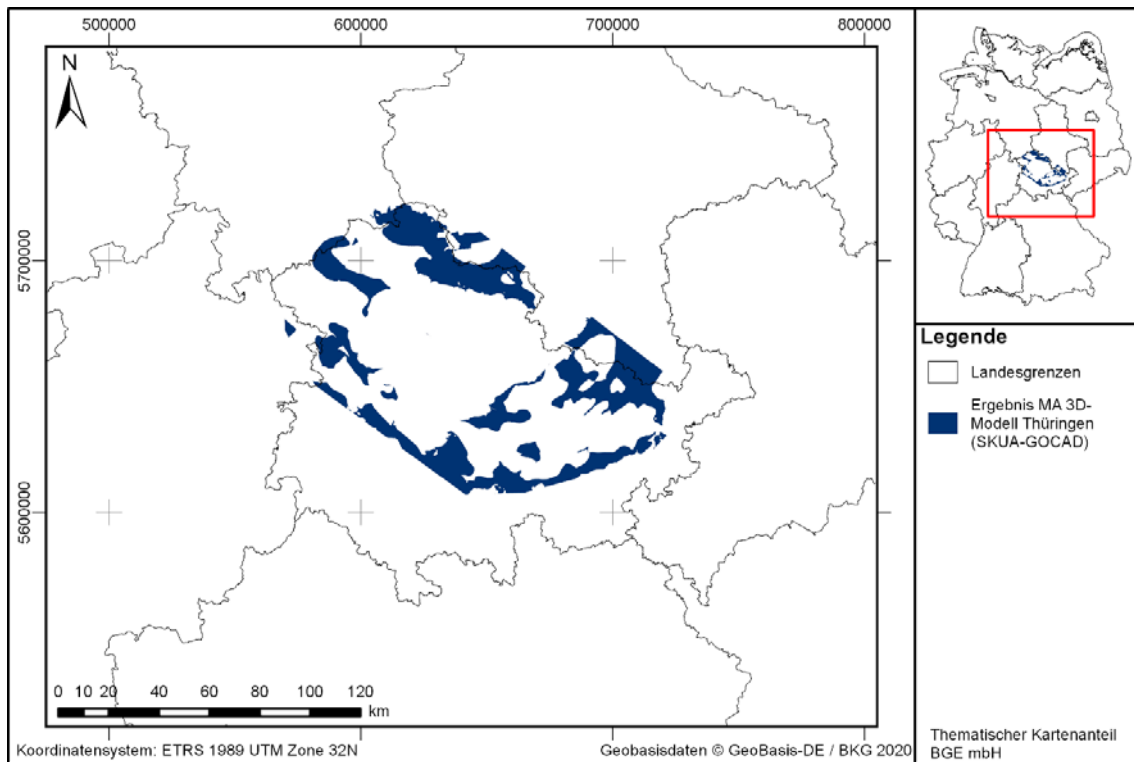


Abbildung 127: Überblick über das Ergebnis der Bearbeitung der Mindestanforderungen in Thüringen anhand der 3D-Modelle in SKUA-GOCAD

Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle 265 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen.

Tabelle 265: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten

DokID	Dateigruppe	Dateiname	Entscheidungserhebliches Datum aus der Datei	Beschreibung
11840020	912	INFLUINS_Surfaces	INFLUINS_OK_G.ts	3D-Modell

Das vorliegende Modellierprotokoll beschreibt die Erstellung einer Quartärbasisfläche (in Meter unter der Geländeoberkante, m u. GOK) für Nord- sowie Teile Mittel- und Süddeutschlands. Grundlage der Bearbeitung waren die der BGE im Rahmen der ersten Datenabfrage zu den Mindestanforderungen vom März 2018 von den Landes- und Bundesbehörden zur Verfügung gestellten Daten und Informationen.

2 Modellierprotokoll zur Erstellung der Quartärbasis

2.1 Einleitung und Zielsetzung

Das im Standortauswahlgesetz (StandAG) geregelte Suchverfahren nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle in Deutschland beginnt in Phase I Schritt 1 mit der Ermittlung von Teilgebieten, die potenziell günstige geologische Bedingungen dafür erwarten lassen. Dazu werden nach § 13 StandAG sukzessive zunächst die Ausschlusskriterien (vgl. § 22 StandAG), dann die Mindestanforderungen (vgl. § 23 StandAG) und anschließend die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (vgl. § 24 StandAG) angewendet.

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) hat in diesem Zusammenhang gemäß § 12 Abs. 3 StandAG Daten und Informationen bei den zuständigen Landes- und Bundesbehörden abgefragt. Im Rahmen der ersten Datenabfrage zu den Mindestanforderungen vom März 2018 wurde dabei u. a. um Informationen zur Tiefenlage der Quartärbasis gebeten, insbesondere mit dem Hintergrund Erkenntnisse über die räumliche Verteilung und Tiefe glazialer Erosionsstrukturen, speziell subglazialer Rinnen mit z. T. großen nachgewiesenen Erosionstiefen (Keller 2009; Stackebrandt 2009; Weitkamp & Bebiolka 2017), zu gewinnen. Erosive Auswirkungen vergangener Glazialzeiten sind sowohl in Nord-, als auch in Süddeutschland bekannt (Reinhardt et al. 2017; Meschede 2018). In der jüngeren geologischen Vergangenheit haben vor allem die Elster- (≈ 390.000 bis 330.000 Jahre vor heute), Saale- (≈ 310.000 bis 126.000 Jahre vor heute) und Weichsel-Kaltzeit (≈ 115.000 bis 11.600 Jahre vor heute) in Norddeutschland bzw. ihre Äquivalente in Süddeutschland die Morphologie und den Untergrund weiter Teile Deutschlands geprägt (Meschede 2018).

Die Entstehung subglazialer Rinnen wird bis heute kontrovers diskutiert (Keller 2009; Reinhardt et al. 2017; Weitkamp & Bebiolka 2017). Sie stehen jedoch eindeutig in Verbindung mit vergangenen Glazialzeiten und stellen aufgrund ihrer Tiefe und lateralen Erstreckung auch über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren, in dem weitere Kaltzeiten nicht auszuschließen sind (Keller 2009), eine potenzielle Gefahr für die Integrität eines möglichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs dar. Bisherige Arbeiten zeigten, dass subglaziale Rinnen vor allem im Norden Deutschlands verbreitet sind (Weitkamp & Bebiolka 2017). Die tiefsten Rinnen stehen dabei im Allgemeinen mit der Elster-Kaltzeit in Verbindung (Stackebrandt 2009).

Subglaziale Rinnen stellen in Hinblick auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle prinzipiell bereits heute negative Beeinträchtigungen des Untergrundes dar. Sie sind hinsichtlich der Bewertung des Deckgebirgszustands somit auch für die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien von Relevanz (vgl. Anlage 11 (zu § 24 Abs.5) StandAG).

Das vorliegende Protokoll beschreibt die Modellierung einer Quartärbasisfläche für Nord- sowie Teile Mittel- und Süddeutschlands auf Basis der der BGE im Rahmen der ersten Datenabfrage zu den Mindestanforderungen zur Verfügung gestellten Daten und

Informationen. Ziel der Modellierung war es insbesondere, die Verteilung und Tiefe subglazialer Rinnen zu rekonstruieren.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten, auf denen die Modellierung basiert, aufgeführt, die Bearbeitungsschritte erläutert und die Ergebnisse visualisiert.

2.2 Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, die von den Landes- und Bundesbehörden für die Bearbeitung der Fragestellung zur Verfügung gestellt wurden (Tabelle 266, Tabelle 267). Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 (UTM 32N / ETRS 1989) festgelegt. Wenn nötig, wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle 266: Auflistung der verwendeten Eingangsdaten für Nord- und Teile Mitteldeutschlands

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	tif	DGM10	Digitales Geländemodell
3	DE	BGR	11844870/ 6850	shp	Basis_q_gesamt_Gorleben_Polyline	Tiefenlage der Quartärbasis im Raum Gorleben
4	DE	BGR	11844870/ 6851	shp	Basis_q_topcr_Gorleben_Polygon	Tiefenlage der Quartärbasis im Raum Gorleben
5	SH	LLUR	11839735/ 6230	shp	qp_basis_NHN_SH	Tiefenlage der Quartärbasis in Schleswig-Holstein
6	MV	LUNG	11840104/ 114	shp	q_basis_lin	Tiefenlage der Quartärbasis in Mecklenburg-Vorpommern
7	NI	LBEG	11881994/ 8468	shp	GKTQ500	Tiefenlage der Quartärbasis in Niedersachsen
8	HH	BUE	11842167/ 356	shp	qp_Basis_HH	Tiefenlage der Quartärbasis in Hamburg

9	BB	LBGR	11842089/ 4289	shp	qua_bas_arc	Tiefenlage der Quartärbasis in Brandenburg
10	ST	LAGB	11843326/ 807	shp	Quartaerbasis	Tiefenlage der Quartärbasis in Sachsen-Anhalt
11	SN	LfULG	11839476/ 686	shp	Quart_Bottom_Sachsen-Polygon	Tiefenlage der Quartärbasis in Sachsen
12	NRW	GD NRW	11842255/ 142	shp	Quartaer_b_ct_gdb	Tiefenlage der Quartärbasis in Nordrhein-Westfalen

Tabelle 267: Auflistung der verwendeten Eingangsdaten für Süd- und Teile Mitteldeutschlands

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Beschreibung
1	DE	BKG	11875056/ 7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)	Verwaltungsgrenzen
2	DE	BKG	11865482/ 8853	tif	DGM10	Digitales Geländemodell
3	TH	TLUG	11840020/ 917	shp	Hoehenlinien	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Thüringen
4	TH	TLUG	11840020/ 918	shp	Q_Verbreitung_FL	Verbreitung Quartär
5	RP	LGB	11842463/ 5272	shp	qubasis_line	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Rheinland-Pfalz
6	RP	LGB	11842463/ 7584	shp	g_posblgl	Tiefenlage der Quartärbasis im Bereich des Oberrheingrabens
7	BW	LGRB	11842115/ 2572	shp	profile_isong_3_4_5	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Baden-Württemberg

8	BW	LGRB	11842115/ 2573	shp	profile_isong2	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Baden-Württem- berg
9	BW	LGRB	11842115/ 2574	shp	profile_isong1	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Baden-Württem- berg
10	BW	LGRB	11842115/ 2582	shp	gebietsaufteilung_i- song	Gebietsaufteilung I- SONG
11	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk50_boden- see_1984_ok_t_clip _by	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern
12	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk50_donau_e_ud- luft_2000_uk_q	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern
13	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk50_donau_w_ud- luft_2000_uk_q	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern
14	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk50_iller_uk_q_clip _by	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern
15	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk100_reg04_2002_ uk_q_main_regnitz	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern
16	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk100_reg10_2002_ uk_q_donau	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern
17	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk100_reg12_2011_ uk_q_donau	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern
18	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk100_reg13_2007_ uk_q_inn	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern
19	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk100_reg13_2007_ uk_q_isar	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern
20	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk100_reg13_2007_ uk_q_vils	Tiefenlage der Quar- tärbasis in einem Teil von Bayern

21	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk5927_uk_q	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Bayern
22	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk6020_uk_q_clip_by	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Bayern
23	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk_3dreg07_200x_uk_regnitztal	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Bayern
24	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk_3dreg10_2002_uk_qaltmuehl	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Bayern
25	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk_ammertal_rahmenplan_1975_ok_festgest	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Bayern
26	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk_bgr_2017_pqo	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Bayern
27	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk_gepo_ms_aussen_2015_uk_q	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Bayern
28	BY	LfU	11842369/ 6131	shp	sk_gepo_ms_innen_2015_uk_q	Tiefenlage der Quartärbasis in einem Teil von Bayern

2.2.1 Modellierung der Quartärbasis

2.2.1.1 Vorgehensweise bei der Bearbeitung

Die Schrittfolge, mit der die Quartärbasisfläche in Nord- und Mitteldeutschland modelliert wurde, ist in Tabelle 268 aufgelistet. Der Bearbeitungsweg für Süddeutschland ist in Tabelle 269 dargestellt.

Tabelle 268: Vorgehensweise zur Erstellung der Quartärbasisfläche für Nord- und Teile Mitteldeutschlands

Arbeitsschritte
1. GIS-Kartenprojekt erstellen und Datenstruktur anlegen
2. Geodaten in GIS-Kartenprojekt einladen
3. Überprüfung der Koordinatensysteme, ggf. Transformation ins Zielkoordinatensystem

4. Umwandlung des DGM10 in ein DGM100 (Anpassen der Zellengröße)
5. Umwandlung der mit Informationen zur Tiefenlage der Quartärbasis versehenen Vektor- in Rasterdatensätze (Zellengröße 100 m), ggf. unter Einbeziehung genauer Verbreitungsinformationen
6. Zuschneiden des selbst erstellten DGM100 auf die in verschiedenen Einheiten vorliegenden Rasterdatensätze zur Tiefenlage der Quartärbasis
7. Subtraktion der passgenauen DGM100-Flächen und der nicht in der Zieleinheit m u. GOK vorliegenden Rasterdatensätze zur Tiefenlage der Quartärbasis zur Erstellung von Rasterdatensätzen in m u. GOK
8. Bedarfsweises Anpassen von Werten durch Multiplikation mit „-1“
9. Entsprechende Bundeslandpolygone als Layer exportieren und neue Spalte „Wert“ einfügen. „Wert“ für alle Feature gleich 0 setzen.
10. Erstellung eines Rasters aus Polygon (aus vorherigem Schritt) mit dem Geoverarbeitungstool „Polygon in Raster“ (Zellengröße 100 m)
11. Anwendung der Raster-Funktion „Maske“ auf DGM100 der entsprechenden Bundesländer (Min = 200, Max = 3000)
12. Erzeugte Raster werden von sich selbst subtrahiert um den Wert 0 zu erhalten, Raster-Funktion „Minus“
13. Zusammenfügen der erzeugten Einzelraster aus vorherigem Schritt mittels Raster-Funktion „Mosaikieren“ (Operation „Erster“)
14. Zusammenfügen der Quartärbasiskarten der entsprechenden Bundesländer sowie der Karten von Gorleben, Raster-Funktion „Mosaikieren“ (Operation „Erster“, wobei die kleinen Datensätze von Gorleben Tab.1 Nr. 3 und 4 über der Quartärbasis der Bundesländer liegen)
15. Zusammenfügen der Raster aus Schritt 10 und 14 mittels Raster-Funktion „Mosaikieren“ (Operation „Maximum“)
16. Zusammenfügen der Raster aus Schritt 15 und 13 mittels Raster Funktion „Mosaikieren“ (Operation „Letzter“, Raster aus Schritt 13 liegt über dem aus Schritt 15)
17. Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse, insbesondere durch Abgleich mit Fachliteratur

Tabelle 269: Vorgehensweise zur Erstellung der Quartärbasisfläche für Süd- und Teile Mitteldeutschlands

Arbeitsschritte
1. GIS-Kartenprojekt erstellen und Datenstruktur anlegen
2. Geodaten in GIS-Kartenprojekt einladen
3. Überprüfung der Koordinatensysteme, ggf. Transformation ins Zielkoordinatensystem
4. Umwandlung des DGM10 in ein DGM100 (Anpassen der Zellengröße)

5. Umwandlung der mit Informationen zur Tiefenlage der Quartärbasis versehenen Vektor- in Rasterdatensätze (Zellengröße 100 m), ggf. unter Einbeziehung genauer Verbreitungsinformationen
6. Zuschneiden des selbst erstellten DGM100 auf die in verschiedenen Einheiten vorliegenden Rasterdatensätze zur Tiefenlage der Quartärbasis
7. Subtraktion der passgenauen DGM100-Flächen und der nicht in der Zieleinheit m u. GOK vorliegenden Rasterdatensätze zur Tiefenlage der Quartärbasis zur Erstellung von Rasterdatensätzen in m u. GOK
8. Bedarfsweises Anpassen von Werten durch Multiplikation mit „-1“
9. Entsprechende Bundeslandpolygone als Layer exportieren und neue Spalte „Wert“ einfügen. „Wert“ für alle Feature gleich 0 setzen.
10. Erstellung eines Rasters aus Polygon (aus vorherigem Schritt) mit dem Geoverarbeitungstool „Polygon in Raster“ (Zellengröße 100 m)
11. Erstellung eines Polygons zur Vorbereitung der Quartärbasis für Rheinland-Pfalz auf Grundlage der gelieferten Iso-Linien
12. Anwendung des Geoverarbeitungstools „Puffer“ auf Iso-Linien in Bayern (Abstand: 250 m, „Zusammenführen aller Ausgabe Features zu einzelnen Feature“)
13. Erstellen von Polygonen zur Schließung größerer Flächen in Polygon aus vorherigem Schritt, mit anschließenden Zusammenführen.
14. Zusammenführung aller Polygon Layer welche die Verbreitung der Quartärbasis in den entsprechenden Bundesländern anzeigen mittels Geoverarbeitungstool „Vereinigen“
15. Ausschneiden des Polygons aus Schritt 14 von Schritt 9
16. Hinzufügen der Spalte „Wert“ in resultierendem Polygon. „Wert“ gleich 0 setzen.
17. Erstellung eines Rasters aus Polygon (aus vorherigem Schritt) mit dem Geoverarbeitungstool „Polygon in Raster“ (Zellengröße 100 m)
18. Erstellung von Polygonen zur Verbreitung der Quartärbasis für die Datensätze Tab.2 Nr. 27 und 28 und anschließendes Verschneiden der dazugehörigen Quartärbasis Raster durch das Geoverarbeitungstool „Nach Maske extrahieren“.
19. Zusammenfügen der Quartärbasiskarten der entsprechenden Bundesländer, Raster-Funktion „Mosaikieren“ (Operation „Erster“)
20. Zusammenfügen der Raster aus Schritt 10 und 18 mittels Raster-Funktion „Mosaikieren“ (Operation „Maximum“)
21. Zusammenfügen der Raster aus Schritt 19 und 17 mittels Raster Funktion „Mosaikieren“ (Operation „Letzter“, Raster aus Schritt 17 liegt über dem aus Schritt 19)
22. Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse, insbesondere durch Abgleich mit Fachliteratur

2.2.2 Anmerkungen zur Bearbeitung

Aufgrund der Heterogenität der eingegangenen Daten ergaben sich z. T. Besonderheiten bei der Bearbeitung, die hier kurz vorgestellt werden sollen. Insbesondere wichtig zu erwähnen ist, dass die von den Bundesländern Berlin und Bremen zur Verfügung gestellten Daten zur Tiefenlage der Quartärbasis nicht individuell berücksichtigt wurden. Stattdessen wurden bei der Modellierung die entsprechenden Datensätze aus Brandenburg und Niedersachsen verwendet, deren räumliche Ausdehnung die jeweiligen Bundesländer mit einschließt. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurde der Datensatz zur Tiefenlage der Quartärbasis aus Hessen, welcher als Vorabversion, also als noch nicht finales Ergebnis, interpretiert wurde. Drei lokale Datensätze aus Bayern wurden nicht berücksichtigt, da diese nicht eindeutig der Quartärbasis zugeordnet werden konnten und bei der Verrechnung mit dem DGM unplausible Ergebnisse erzeugten.

Die Modellierung erfolgte, mit Ausnahme des digitalen Geländemodells, ausschließlich auf Basis zur Verfügung gestellter Vektordatensätze unter Zuhilfenahme von Geodatenbanken. Ausgangsdaten im Rasterformat, beispielweise gescanntes Kartenmaterial, wurde zum jetzigen Zeitpunkt nicht berücksichtigt. Daten wurden darüber hinaus bei Bedarf auf das jeweilige Bundesland zugeschnitten. Die Ermittlung der finalen Flächen in der Zieleinheit m u. GOK erfolgte mittels Subtraktion des digitalen Geländemodells mit den nicht in der Zieleinheit vorliegenden Rasterdatensätzen. Dabei eventuell entstehende negative Werte wurden als Ungenauigkeiten interpretiert und mit dem Wert 0 gleichgesetzt. Bereiche mit in Hinblick auf die Tiefenlage der Quartärbasis unsicheren oder nicht vorhandenen Daten wurden im Ergebnis entsprechend gekennzeichnet und im Anschluss an die Modellierung zur weiteren Bearbeitung mit dem Wert 0 versehen, also der Erdoberfläche gleichgesetzt.

Zum Teil waren mehrere Datensätze für die gleiche Fläche vorhanden. In diesen Bereichen wurde von einem höheren Detailgrad der kleineren Ausschnitte ausgegangen, diese wurden in der anschließenden Bearbeitung über die Raster der Bundesländer gelegt und die Werte dadurch lediglich ersetzt. Die Randbereiche wurden dabei nicht angepasst.

2.2.3 Ergebnis

In *Abbildung 128* ist das Ergebnis der Modellierung der Quartärbasis in Nord- und Teilen Mitteldeutschlands dargestellt.

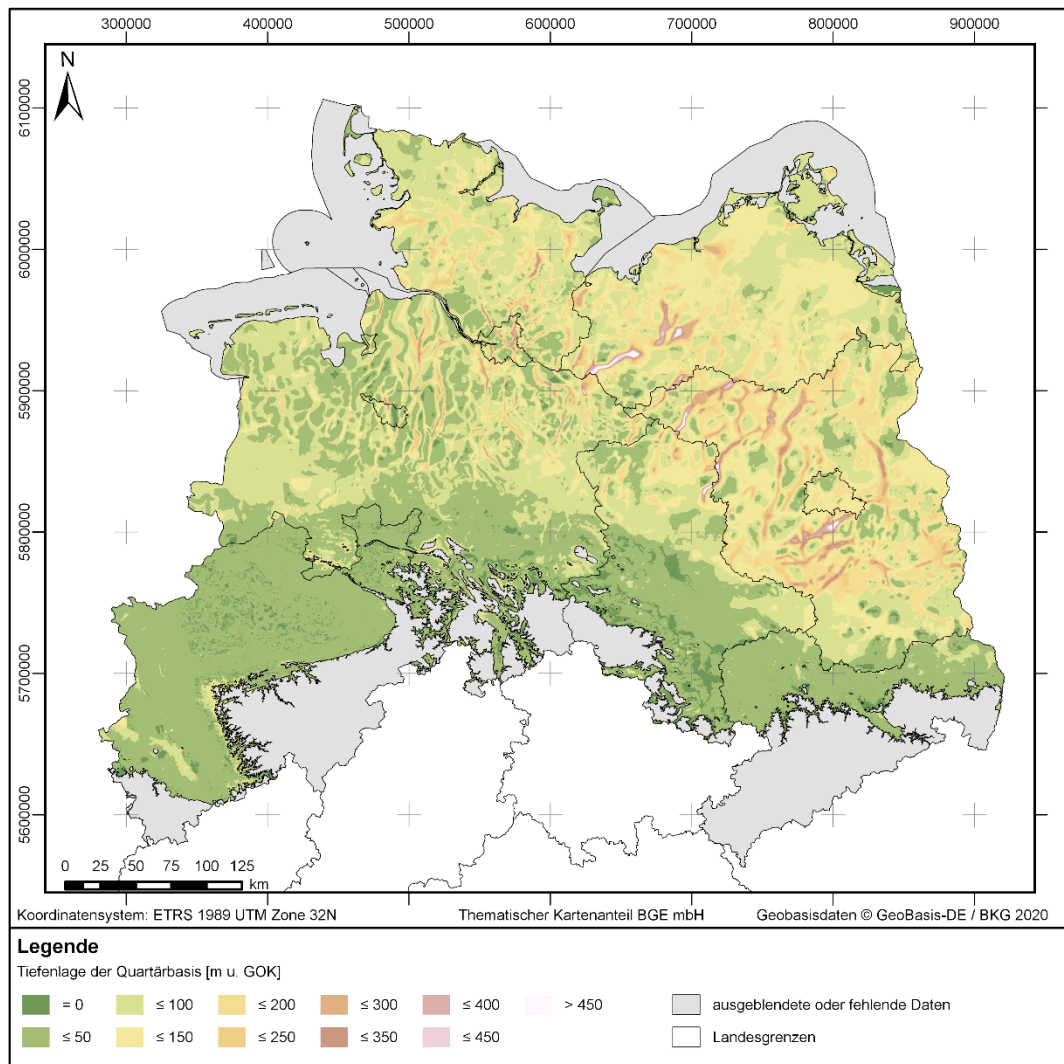


Abbildung 128: Überblick über das Ergebnis der Modellierung der Quartärbasis in Nord- und Teilen Mitteldeutschlands

In *Abbildung 129* ist das Ergebnis der Modellierung der Quartärbasis in Süd- und Teilen Mitteldeutschlands dargestellt.

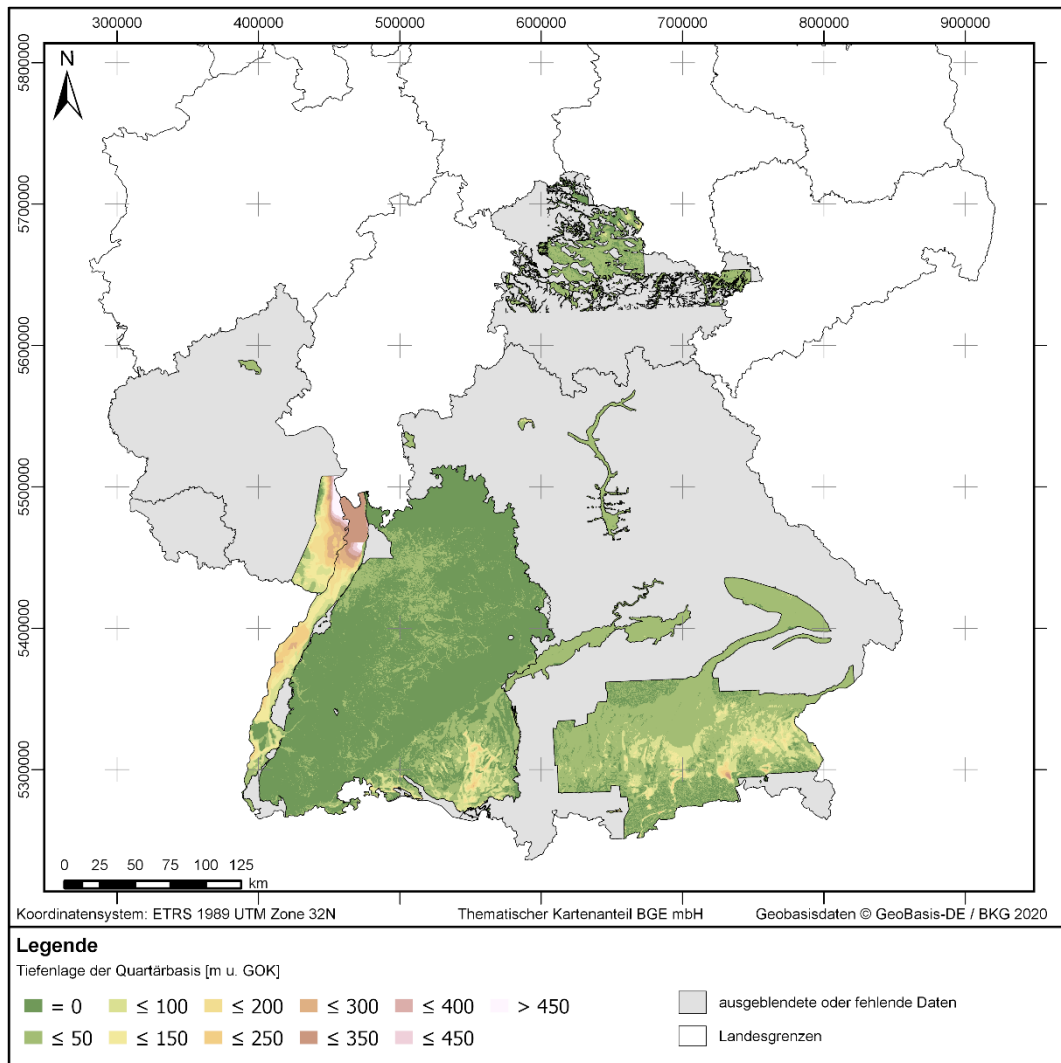


Abbildung 129: Überblick über das Ergebnis der Modellierung der Quartärbasis in Süd- und Teilen Mitteldeutschlands

2.2.4 Entscheidungserhebliche Tatsachen

Alle in den Tabelle 266 und Tabelle 267 aufgeführten Daten sowie die erstellten Quartärbasisflächen werden als entscheidungserheblich eingestuft.

3 Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Köln
- Allia, V. (1996): Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz. Dissertation, Universität Basel, Geologisch-Paläontologisches Institut., S. 185, Basel,
- Althen, G., Rusbült, J. & Seeger, J. (1980): Ergebnisse einer regionalen Neubearbeitung des Muschelkalkes. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 8, S. 985-999
- Amelung, P., Billaux, D., Polster, M., Schmidt, H., Uhlig, L. & Jobmann, M. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS. DBE Technology. Peine
- Arndt, D. & Bär, K. (2011): Forschungs- und Entwicklungsprojekt „3D-Modell der geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen“. Abschlussbericht. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt
- Bachmann, G. H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (2008): Geologie von Sachsen-Anhalt: mit 54 Tabellen. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652402
- Baldschuhn, R. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor: Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie; Deutsch - Englisch ; Tectonic atlas. Hannover: Schweizerbart. ISBN 3510958810
- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. Geologisches Jahrbuch, Bd. A 153, S. 88
- Bankwitz, P., Kopp, J. & Ehling, B.-C. (2001): Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) im Abschnitt Halle-Guben. In: Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil II: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg. Bd. 234, S. 236, Courier Forschungsinstitut Senckenberg, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 3-510-61332-5
- Barth, G. (2019): Stratigraphie, Fazies und geothermisches Potenzial von fluviodeltaischen Ablagerungsräumen der Oberen Trias und des Unteren Jura im östlichen Teil des Mitteleuropäischen Beckens. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 15.11.2019
- Barth, G., Pieńkowski, G., Zimmermann, J., Franz, M. & Kuhlmann, G. (2018): Palaeogeographical evolution of the Lower Jurassic: high-resolution biostratigraphy and sequence stratigraphy in the Central European Basin. Geological Society, London, Special Publications, Bd. 469, S. 341-369. ISSN 03058719. DOI: 10.1144/SP469.8
- Bauer, M., Schust, F., Stedingk, K. & Matheis, G. (1995): The hidden granites of Flechtingen and Roxförde, North German Basin. Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I, Geologie, Bd. 5/6, S. 553-560. ISSN 0340-5109
- Bebiolka, A., Göthel, M. & Höding, T. (2011): Speicher- und Barrieregesteine im tiefen Untergrund von Brandenburg und Berlin. In: C. Müller & K. Reinhold (Hrsg.): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in

- Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland. Bd. 74, S. 82-111, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Hannover: Schweizerbart. ISBN 978-3510492220
- Berger, H.-J., Brause, H. & Linnemann, U. (2011): Baueinheiten des Grundgebirgsstockwerkes: Die cadomische tektonometamorph-magmatische Entwicklung. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.): Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. 2. Aufl., S. 40-51, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65270-9
- Best, G. & Zirngast, M. (2002): Die strukturelle Entwicklung der exhumierten Salzstruktur "Oberes Allertal". Hannover: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe. ISBN 978-3-9813373-0-3
- Beutler, G. (2004): Trias. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern S. 140-150, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung ISBN 3-510-65210-X
- Beutler, G., Hauschke, N., Nitsch, E. & Vath, U. (2005): Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-61376-2
- Beutler, G. & Mönnig, E. (2008): Jura. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 231-243, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
- Beutler, G. & Nitsch, E. (2005): Paläogeographischer Überblick. In: G. Beutler, N. Hauschke, E. Nitsch & U. Vath (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper. S. 15-30, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission / Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg ISBN 978-3-510-61376-2
- Beutler, G. & Tessin, R. (2005): Der Keuper im Norddeutschen Becken. In: G. Beutler, N. Hauschke, E. Nitsch & U. Vath (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper. S. 134 - 150, 4, Stuttgart: Courier Forschungsinstitut Senckenberg. ISBN 3-510-61376-7
- BGE (2020b): Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG - Grundlagen. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
- BGE (2020h): Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020j): Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020k): Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020l): Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020m): Herleitung der maximalen Teufe eines Endlagers als ein Element zum Verständnis der Begrenzung des Suchraumes auf 1500 m unter der Geländeoberkante. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

- Blankenburg, H. J. & Rösler, H. J. (1978): SiO₂-Mobilisation und Quarzbildung beim Kaolinisierungsprozeß. Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 24, S. 173 - 179. ISSN 0044-2259
- Bloos, G., Franz & Hildebrandt (2014): Langenbrücken-Formation - Record Nr. 4012050. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 02.01.2015. Zugriff am: 03.09.2020.
<https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012050>
- Blumenstengel, H. & Krutzsch, W. (2008): Tertiär. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt: mit 54 Tabellen. S. 267-292, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652402
- Boigk, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland - Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik. Stuttgart: Enke. ISBN 3-432-91271-4
- Bombien, H., Hoffers, B., Breuckmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J., Schmidt, C., Slaby, M.-F. & Ziesch, J. (2012): Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell Einleitung. Gmit Geowissenschaftliche Mitteilungen, Bd. 48, S. 6-13
- Borchert, H. & Muir, R. O. (1964): Salt Deposits: The Origin, Metamorphism and Deformation of Evaporites. London: Van Nostrand
- Bornemann, O., Behlau, J., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2003): Abschlussbericht: Ergebnisse der Erkundung des Salinars - Projekt Gorleben Standortbeschreibung. Archivstück + Sammelmappe. Hannover: BGR
- Boy, J., Dittrich, D., Dreher, T., Flick, H., Gad, J., Goldschmitt, M., Haneke, J., Hauenstein, M., Hohberger, K.-H., Jahnel, C., Krimmel, M., Lorenz, V., Lothhammer, H., Lutz, H., Nagel, J., Requadt, H., Rogall, M., Schreiber, U., Schäfer, P., Wehinger, A. & Weidenfeller, M. (2005): Geologie von Rheinland-Pfalz: mit 36 Tabellen. Stuttgart: Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz - Schweizerbart. ISBN 3510652150
- Boy, J. A., Haneke, J., Kowalczyk, G., Lorenz, V., Schindler, T. & Thum, H. (2012): Rotliegend im Saar-Nahe-Becken, am Taunus-Südrand und im nördlichen Oberrheingraben. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 61, S. 254-377. DOI: 10.1127/sdgg/61/2012/254
- Brätz, H. (2000): Radiometrische Alterdatierungen und geochemische Untersuchungen von Orthogneisen, Graniten und Granitporphyren aus dem Ruhlaer Kristallin, Mitteldeutsche Kristallinzone. Dissertation, Universität Würzburg, S. 131, Würzburg. DOI: urn:nbn:de:bvb:20-opus-2320
- Brinkmann, R. (1948): Die Mitteldeutsche Schwelle. Geologische Rundschau, Bd. 36, S. 56-66
- Brückner-Röhling, S. (1999): Abschlußbericht: Sequenzstratigraphie des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland und der Deutschen Nordsee. Abschlussbericht. Hannover, Halle: BGR [u.a.]
- Brun, J. P., Gutscher, M.-A. & deKORP-ECORS teams (1992): Deep crustal structure of the Rhine Graben from DEKORP-ECORS seismic reflection data: A summary. Tectonophysics, Bd. 208, S. 139-147. ISSN 00401951 DOI: 10.1016/0040-1951(92)90340-C

- Bryant, W. R. (2003): Permeability of Clays, Silty-Clays and Clayey-Silts. In: E. D. Scott, A. H. Bouma & W. R. Bryant (Hrsg.): Siltstones, Mudstones and Shales: Depositional Processes and Characteristics. Bd. 1, S. 344-352, Tulsa, Oklahoma: SEPM Society for Sedimentary Geology - Gulf Coast Association of Geological Societies. ISBN 9781565760943. DOI: 10.2110/sepmmisc.01.0344
- BT-Drs. 18/11398: Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutsche Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017
- Büchner, J., Tietz, O., Viereck, L., Suhr, P. & Abratis, M. (2015): Volcanology, geochemistry and age of the Lausitz Volcanic Field. International Journal of Earth Sciences, Bd. 104, S. 2057-2083. ISSN 1437-3262. DOI: 10.1007/s00531-015-1165-3
- Bues, C., Behrmann, J., Franke, W., Pauli, C., Seibert, J. & Zulauf, G. (1998): Strukturentwicklung und Kinematik der Metabasite und Metapelite im Grenzbereich Teplá-Barrandium-Moldanubikum im Raum Hoher Bogen-Rittsteig (NE Bayern). Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 149, S. 329-343
- Chappell, B. W. & White, A. J. R. (1974): Two contrasting granite types. Pacific Geology, Bd. 8, S. 173-174
- Colditz, M., Dieckmann, E., Protze, N. & Schmidt, I. (2019): Heimat und Welt. Sachsen Anhalt: Westermann Gruppe
- DBE TEC (2016): Gutachten - Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. K-MAT 58. DBE Technology GmbH, o. O.
- de Boer, H. U. (1971): Gefügeregelung in Salzstöcken und in ihren Hüllgesteinen. Kali und Steinsalz, Bd. 12, S. 403-425
- de Wall, H., Schaarschmidt, A., Kämmlein, M., Gabriel, G., Bestmann, M. & Scharfenberg, L. (2019): Subsurface granites in the Franconian Basin as the source of enhanced geothermal gradients: a key study from gravity and thermal modeling of the Bayreuth Granite. International Journal of Earth Sciences, Bd. 108, S. 1913-1936. ISSN 1437-3262. DOI: 10.1007/s00531-019-01740-8
- Derer, C. E. (2003): Tectono-sedimentary evolution of the northern Upper Rhine Graben (Germany), with special regard to the early syn-rift stage. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn, 01.08.2003
- Dersch-Hansmann, M., Lepper, J., Rambow, D., Tietze, K.-W. & Wenzel, B. (2013): Der Buntsandstein in der zentralen Hessischen Senke. In: J. Lepper & H.-G. Röhling (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. Bd. 69, S. 385-419, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-49229-9
- Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.: M. Menning & A. Hendrich) (2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland. Potsdam: Deutsche Stratigraphische Kommission
- Dèzes, P., Schmid, S. M. & Ziegler, P. A. (2004): Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere. Tectonophysics, Bd. 389, S. 1-33. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/j.tecto.2004.06.011

- Diener, I. (1973): Paläogeographie des Mesozoikums in der DDR (Atlas im Maßstab <1:500000> mit Erläuterungen: Unterkreide). Berlin, Ost: ZGI
- Diener, I. (2000a): Altmark und Brandenburg - Unterkreide. In: M. Hiss & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland. Bd. 226, S. 207, Frankfurt a. M. : Stratigraph. Komm. Deutschl. - Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 9783510610471
- Diener, I. (2000b): Unterkreide (Mecklenburg-Vorpommern). In: M. Hiss & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland. Bd. 226, S. 207, Frankfurt a. M. : Stratigraph. Komm. Deutschl. - Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 9783510610471
- Diener, I., Rusbült, J. & Reich, M. (2004): Unterkreide. In: B. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 580, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65210-5
- Dockter, J. & Langbein, R. (2003): Keuper. In: G. Seidel (Hrsg.): Geologie von Thüringen. S. 357-391, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN ISBN 978-3-510-65205-1
- Doehl, F. (1967): The Tertiary and Pleistocene sediments of the northern and central part of the Upper Rhinegraben. In: J. P. Rothe & K. Sauer (Hrsg.): The Rhinegraben progress report 1967. Bd. 6, S. 48-54, Freiburg i. Br.: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg
- Dölling, M., Hiß, M. & Kaplan, U. (2018): Stenwede-Formation - Record Nr. 2008001. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 25.09.2018. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de>
- Doornenbal, H. & Stevenson, A. (Hrsg.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area: A complete overview of the geological development from Precambrian to Holocene, hydrocarbons exploration and exploitation. Houten: EAGE Publications b. v. ISBN 9789073781610
- Doppler, G., Heissig, K. & Reichenbacher, B. (2005): Die Gliederung des Tertiärs im süddeutschen Molassebecken. Newsletters on Stratigraphy, Bd. 41, S. 359-375. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0359
- Doppler, G., Hintermaier, G., Sidiropoulos, T., Bader, K. & Grottenthaler, W. (1982): Geologische Karte von Bayern 1:25000 _ Erläuterungen zum Blatt Nr. 7941 Trostberg. Bayrisches Geologisches Landesamt. München
- Drong, H. J. (2003): Das kristalline Grundgebirge in Bohrungen des nordwestlichen Alpenvorlandes. Geologica Bavarica, Bd. 108, S. 13-110
- Drozdrewski, G. (2005): Zur sedimentären Entwicklung des Subvariscikums im Namurium und Westfalium Nordwestdeutschlands. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland V - Das Oberkarbon (Pennsylvanium) in Deutschland. S. 271-320, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510613809
- Drozdewski, G. & Wrede, V. (1994): Faltung und Bruchtektonik - Analyse der Tektonik im Subvariscikum. Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen - Das Subvariscikum Nordwestdeutschlands: Struktur und Lagerstättenpotential eines Vorlandbeckens, Bd. 38, S. 7-187
- Dünkel, H. & Vath, U. (1990): Ein vollständiges Profil des Muschelkalks (Mitteltrias) der Dransfelder Hochfläche, SW Göttingen (Süd-niedersachsen). Geologisches Jahrbuch Hessen, Bd. 118, S. 87-126. ISSN 03414027

- Ehlers, J. (2011): Geologische Karte von Hamburg 1:25 000 - Erläuterungen zu Blatt Nr. 2326 Fuhlsbüttel. Hamburg: Geologisches Landesamt Hamburg. ISBN 978-3-9810981-7-4
- Ehling, B.-C. (2008): Regionalgeologische Einheiten – Flechtingen-Roßlau-Scholle. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 370- 375, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652402
- Elbracht, J., Meyer, R., Reutter, E., Linder, B. & Mai, C. (2016): Geoberichte 3 - Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen. Geobericht ISSN 1864–7529 Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Hannover
- Erren, J. W. M. G. & Bredewout, J. W. (1991): Model calculations on intrusive cooling and related coalification of the Peel - Erkelenz coalfield, The Netherlands and Germany. Netherlands Journal of Geosciences, Bd. 70, S. 143 - 151. ISSN 1573-9708. DOI: urn:nbn:nl:ui:28-302d66d5-dee3-4a93-9077-a6e9806aee7a
- Farrenschon, J. (2005): Der Keuper des Weserberglandes. In: G. Beutler, N. Hauschke, E. Nitsch & U. Vath (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV _ Keuper. S. 155-162, 4, Stuttgart: Courier Forschungsinstitut Senckenberg - Schweizerbart ISBN 3-510-61376-7
- Feldrappe, H. (2003): F + E Endlagerung - Untersuchung von Tongesteinen als Barriere für die Endlagerung radioaktiver Abfälle am Beispiel des Mittleren Jura (Dogger) von Nordost-Deutschland. Berlin: BGR
- Feldrappe, H. (2006): Regionale Tonstudie: Untersuchungen der Tongesteinsformationen des Mitteljura von Nordwest-Deutschland hinsichtlich ihrer Eignung als Barriere für die Endlagerung radioaktiver Abfälle - F+E Endlagerung. Hannover: BGR
- Finger, F., Gerdes, A., Janousek, V., Rene, M. & Riegler, G. (2007): Resolving the Variscan evolution of the Moldanubian sector of the Bohemian Massif: the significance of the Bavarian and the Moravo-Moldanubian tectonometamorphic phases. Journal of Geosciences, Bd. 52, S. 9-28. ISSN 1803-1943. DOI: <http://dx.doi.org/10.3190/jgeosci.005>
- Finger, F. & René, M. (2009): A Comment on 'Two Distinctive Granite Suites in the SW Bohemian Massif and their Record of Emplacement: Constraints from Geochemistry and Zircon 207Pb/206Pb Chronology' by Siebel et al. Journal of Petrology, 1853–1872. Journal of Petrology, Bd. 50, S. 591-593. ISSN 0022-3530. DOI: 10.1093/petrology/egp013
- Fischbeck, R. & Bornemann, O. (1993): Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Kluffüllungen. Geologisches Jahrbuch, Bd. A 142, S. 233-256
- Flöttmann, T. & Oncken, O. (1992): Constraints on the evolution of the Mid German Crystalline Rise — a study of outcrops west of the river Rhine. Geologische Rundschau, Bd. 81, S. 515-543. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/BF01828613
- Förster, H.-J. & Rhede, D. (2006): The Be-Ta-rich granite of Seiffen (eastern Erzgebirge, Germany): accessory-mineral chemistry, composition, and age of a late-Variscan Li-F granite of A-type affinity. Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen, Bd. 182, S. 307-321. DOI: 10.1127/0077-7757/2006/0055
- Förster, H.-J., Tischendorf, G., Pälchen, W., Benek, R., Seltmann, R. & Kramer, M. (2011): Spätvariszischer Magmatismus. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.):

- Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. 2. Aufl., S. 257-296, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65270-9
- Förster, H.-J., Tischendorf, G., Trumbull, R. B. & Gottesmann, B. (1999): Late-Collisional Granites in the Variscan Erzgebirge, Germany. *Journal of Petrology*, Bd. 40, S. 1613-1645. ISSN 0022-3530. DOI: 10.1093/petroj/40.11.1613
- Franke, D. (2020): Geologie von Ostdeutschland (Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern) - Ein Kompendium. Glienicke/Nordbahn: Dietrich Franke. Letzte Aktualisierung am: Last updated 12.02.2020. Zugriff am: 01.03.2020. <http://www.regionalgeologie-ost.de/>
- Franke, D., Hoffmann, N. & Kopp, J. (2015a): Krustenbau und kristallines Fundament. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): *Geologie von Brandenburg*. S. 439-448, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652952
- Franke, D., Hoffmann, N. & Kopp, J. (2015b): Strukturgeologische Entwicklung. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): *Geologie von Brandenburg*. S. 439-462, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652952
- Franke, W. (1989): The geological framework of the KTB drill site, Oberpfalz. In: R. Emmermann & J. Wohlenberg (Hrsg.): *The German Continental Deep Drilling Program (KTB)*. S. 37-54: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-74588-1
- Franke, W. (2000): The mid-European segment of the Variscides: tectonostratigraphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution. *Geological Society, London, Special Publications*, Bd. 179, S. 35-61. DOI: 10.1144/gsl.Sp.2000.179.01.05
- Franz, M. (2009): Kandern-Formation - Record Nr. 4012008. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 22.09.2009. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012008>
- Franz, M. & Nitsch, E. (2009): Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden-Württemberg. *LGRB-Informationen*, Bd. 22, S. 123-146
- Franz, M., Simon, T., Meyer, R. K. F. & Doppler, G. (2001): Die Thermalwasserbohrung "Donautherme", Neu-Ulm. *Geologica Bavarica*, Bd. 106, S. 81-106
- Franz, M., Zeiss, A. & Mönnig, E. (2013): Opalinuston-Formation - Record Nr. 4012027. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR - Litholex. Letzte Aktualisierung am: 09.01.2013. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012027>
- Freudenberger, W. & Schwerd, K. (1996): Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000. 4. neubearbeitete. Aufl. Bayerisches Geologisches Landesamt. München
- Frisch, U. & Kockel, F. (2004): Der Bremen-Knoten im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands: Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie. *Berichte aus dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen. Fachbereich Geowiss., Univ. Bremen*. ISBN 0931-0800
- Gärtner, H. & Röhling, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. In: H. Hagdorn & A. Seilacher (Hrsg.): *Muschelkalk*. S. 443-456, Stuttgart: Edition Goldschneck im Quelle & Meyer Verlag. ISBN 3-926129-11-5
- Gast, S. & Riesenberger, C. (2016): AP 1 – Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten. In: *Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und*

- Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft). Sachbericht 03ESP323B. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (Hrsg.: Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen) (2016): Stratigraphische Gliederung des Juras. Krefeld: GD NRW
- Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (2020): 3D-Modelle des Untergrundes. [Internet website]. Krefeld: GD-NRW. Letzte Aktualisierung am: 2020. Zugriff am: 27.07.2020. https://www.gd.nrw.de/ge_eb_3d_modelle.htm
- GeoMol Team (2015): GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources. Project Report. Bayerisches Landesamt für Umwelt Augsburg
- GeORG-Projektteam (2013a): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben - Teil 1. LGRB-Informationen, Bd. 28. Fachlich-Technischer Abschlussbericht des INTERREG Projekts GeORG, Teil 1. Freiburg i.Br.
- GeORG-Projektteam (2013b): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben - Teil 2. Fachlich-Technischer Abschlussbericht des INTERREG-Projekts GeORG, Teil 2: Geologische Ergebnisse und Nutzungsmöglichkeiten. Freiburg i. Br.
- Geothermiezentrum Bochum (2019): Grenzüberschreitendes EU-Projekt bereitet den Weg für die Nutzung der tiefen Geothermie in Nordrhein-Westfalen. [Webpage]. Bochum: Bundesverband Geothermie. Letzte Aktualisierung am: 22.02.2019. Zugriff am: 10.09.2020. <https://www.geothermie.de/aktuelles/nachrichten/news-anzeigen/news/grenzueberschreitendes-eu-projekt-bereitet-den-weg-fuer-die-nutzung-der-tiefen-geothermie-in-nordrhe.html>
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (Hrsg.) (2011): Geologie von Baden-Württemberg. 5. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652679
- Ghazwani, A. H. (2017): Assessment of palaeozoic unconventional shale oil and shale gas in Northwest Europe: Examples from Scotland and Western Germany based on geochemical data and numerical basin modeling. Dissertation, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und Lagerstätten des Erdöls und der Kohle - Fachgruppe für Geowissenschaften und Geographie, Aachen. DOI: 10.18154/RWTH-2017-10053
- Göthel, M. (2016): Lithologische Interpretation und stratigraphisches Niveau der reflexionsseismischen Horizonte im Untergrund Brandenburgs einschließlich Berlins. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Bd. 23, S. 85 - 90
- Gottesmann, B., Förster, H.-J., Müller, A. & Kämpf, H. (2017): The concealed granite massif of Eichigt-Schönnbrunn (Vogtland, Germany): Petrography, mineralogy, geochemistry and age of the Eichigt apical intrusion. FOG - Freiberg Online Geoscience, Bd. 49, S. 1-49
- Grabert, H. (1998a): Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen: mit 11 Tabellen. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3510651871
- Grabert, H. (1998b): Die Kreide. In: Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen. 1. Aufl., S. 351, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 978-3-510-65187-0
- Grabert, H. (1998c): Die Unterkreide. In: Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen. 1. Aufl., S. 351: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 978-3-510-65187-0

- Grimm, M. (2005): Beiträge zur Lithostratigraphie des Paläogens und Neogens im Oberrheingebiet (Oberrheingraben, Mainzer Becken, Hanauer Becken). Geologisches Jahrbuch Hessen, Bd. 132, S. 79-112
- Grimm, M. C., Wielandt-Schuster, U., Hottenrott, M., Radtke, G., Berger, J.-P., Ellwanger, D., Harms, F.-J., Hoselmann, C. P. & Weidenfeller, M. (2011): Oberrheingraben. In: K. I. Grimm (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IX - Tertiär, Teil 1: Oberrheingraben und benachbarte Tertiärgebiete (Schriftenreihe der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften Bd. 75) S. 57-132, Hannover: Deutsche Stratigraphische Kommission. ISBN 978-3-510-49223-7. DOI: 10.1127/sdgg/75/2011/57
- Gürs, K. (2006): Das Tertiär Nordwestdeutschlands in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. Newsletters on Stratigraphy, Bd. 41, S. 313-322. ISSN 0078-0421. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0313
- Gürs, K., Wesselingh, F. & Standke, G. (2008): North Sea Basin: Paleogene. In: T. McCann (Hrsg.): The Geology of Central Europe Volume 2: Mesozoic and Cenozoic – Paleogene and Neogene. S. 1036-1040: Geological Society of London. ISBN 9781862392656. DOI: 10.1144/cev2p
- Hagdorn, H., Menning, M., Nitsch, E. & Simon, T. (2019): Die Muschelkalk-Gruppe in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016). Z. Dt. Ges. Geowiss. (German J. Geol.), Bd., S. 20 Seiten. DOI: 10.1127/zdgg/2019/0197
- Hallam, A. (1984): Pre-Quaternary Sea-Level Changes. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Bd. 12, S. 205-243. DOI: 10.1146/annurev.earth.12.050184.001225
- Haneke, J. & Stollhofen, H. (1994): Das lithostratigraphische Profil der Forschungsbohrung "Münsterappel I". Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen, Bd. 23, S. 221-228. ISSN 0340-4404
- Haq, B., Hardenbol, J. A. N. & Vail, P. (1988): Mesozoic and Cenozoic Chronostratigraphy and Cycles of Sea-Level Change. In: C. K. Wilgus, B. S. Hastings, C. G. S. C. Kendall, C. A. Ross & J. C. Van Wagoner (Hrsg.): Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Bd. 42, S. 7-108, Tulsa, Oklahoma, USA: SEPM Special Publication. DOI: 10.2110/pec.88.01.0071
- Hardenbol, J., Thierry, J., Farley, M., Jaquin, T. & De Gracuabsky, P. C. (1998): Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphic framework of european basins. Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of european basins. SEPM Special Publications, Bd. 60, S. 3-13
- Heilmann-Clausen, C., Nielsen, O. & Gersner, F. (1984): Lithostratigraphy and depositional environments in the Upper Paleocene and Eocene of Denmark. Geological Society of Denmark Bulletin, Bd. 33, S. 287-323
- Henke, K. F. & Hiller, M. (1985): Veränderung bodenmechanischer Parameter bei überkonsolidierten Peliten durch Verwitterung — Versuch einer Deutung anhand des Opalinustones. In: K. Heitfeld (Hrsg.): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen. S. 83-96, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-15366-5. DOI: 10.1007/978-3-642-70452-9_6.
- Henneberg, M., Mertineit, M., Hammer, J. & Zulauf, G. (2018): Fabric, paleostress and mineralogical composition of impure Rotliegend rock salt (North German Basin). In: S. Fahland, J. Hammer, F. Hansen, S. Heusermann, K. H. Lux & W. Minkley (Hrsg.): The Mechanical Behavior of Salt IX: Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX), Hannover, Germany, 12-14

- September 2018. S. 113-141, Hannover: Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR). ISBN 9783981410860
- Hese, F. (2012): 3D-Modellierungen und Visualisierung von Untergrundstrukturen für die Nutzung des unterirdischen Raumes in Schleswig-Holstein. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, S. 156, Kiel,
- Hese, F., Liebsch-Dörschner, T., Offermann, P., Rheinländer, J. & Thomsen, C. (2012): Co2-MoPa: Modellierung und Parametrisierung von CO₂-Speicherung in tiefen, salinen Speichergesteinen für Dimensionierungs- und Risikoanalysen; Vorhaben: Geologische Modelle der Deck- und Speichergesteine Schleswig-Holsteins - Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN; Teilvorhaben M6 "Geologische Modelle der Deck- und Speichergesteine Schleswig-Holstein" (Projektleitung: Rosenbaum, Sabine). Laufzeit des Vorhabens. 01.07.2009 - 30.09.2011. Verbundvorhaben; Schlussbericht; BMBF-Forschungsvorhaben. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Flintbek. DOI: 10.2314/GBV:730644448
- Heunisch, C., Caspers, G., Elbracht, J., Langer, A., Röhling, H.-G., Schwarz, C. & Streif, H. (2017a): Erdgeschichte von Niedersachsen - Geologie und Landschaftsentwicklung. 2017. Geoberichte, Bd. 6. LBEG. Hannover
- Heunisch, C., Caspers, G., Elbracht, J., Langer, A., Röhling, H.-G., Schwarz, C. & Streif, H. (2017b): Erdgeschichte von Niedersachsen. Geologie und Landschaftsentwicklung. Geoberichte. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover
- Hinsch, W. (1974): Das Tertiär im Untergrund von Schleswig-Holstein (Das Nordwestdeutsche Tertiärbecken, Beitrag N.5). Geologisches Jahrbuch, Bd. Reihe A, Heft 24, S. 34. ISSN 9783510964697
- Hinze, C. (1967): Der Obere Buntsandstein (Röt) im südniedersächsischen Bergland. In: B. f. Bodenforschung (Hrsg.): Geologisches Jahrbuch. Bd. 84, S. 637 - 716, Hannover: Bundesanst. f. Bodenforschung
- Hirschmann, G. (1996): KTB — The structure of a Variscan terrane boundary: seismic investigation — drilling — models. Tectonophysics, Bd. 264, S. 327-339. ISSN 0040-1951. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00171-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00171-0)
- Hirschmann, G. & Okrusch, M. (2001): Spessart und Rhön – Teil der MKZ. In: Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil II: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg. Bd. 234, S. 236, Courier Forschungsinstitut Senckenberg, CFS, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 3-510-61332-5
- Hiß, M. (2000): Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland. Frankfurt am Main: Senckenbergische Naturforschende Ges. ISBN 3929907682
- Hiß, M. (2018): Emscher-Formation - Record Nr. 2008007. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 25.09.2018. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=2008007>
- Hiß, M. & Mutterlose, J. (2000): Stratigraphie von Deutschland III. Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland, Frankfurt am Main: Courier Forschungsinstitut Senckenberg. ISBN 9783510610471
- Hiß, M., Niebuhr, B. & Teipel, U. (2018): Die Kreide in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 / The Cretaceous System in the Stratigraphic Table of

- Germany 2016. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, S. 247-266. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0149
- Hiß, M. & Schönfeld, J. (2000): Regionale Verbreitung und Faziesräume der Kreide in der Bundesrepublik. In: M. Hiss & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland., S. 3-6, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Hiß, M. & Seibertz, E. (2000): Westfalen, Münsterland. In: M. Hiss & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland., S. 132-138, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Hoffmann, N., Jödicke, H., Fluche, B., Jording, A. & Müller, W. (1998): Modellvorstellungen zur Verbreitung potentieller präwestfälischer Erdgas-Muttergesteine in Norddeutschland - Ergebnisse neuer magnetotellurischer Messungen. Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 44, S. Seite 140 - 158
- Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Berlin / Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Hudec, M. R. & Jackson, M. P. A. (2007): Terra infirma: Understanding salt tectonics. Earth-Science Reviews, Bd. 82, S. 1-28. DOI: 10.1016/j.earscirev.2007.01.001
- Ishihara, S. (1977): The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. Mining geology, Bd. 27, S. 293-305. ISSN 0026-5209. DOI: 10.11456
- Jahn, S., Mrugalla, S. & Stark, L. (2016): Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) – Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Janssen, R., Doppler, G., Grimm, K., Grimm, M., Haas, U., Hiß, M., Köthe, A., Radtke, G., Reichenbacher, B., Salamon, M., Standke, G., Teipel, U., Thomas, M., Uffenorde, H., Wielandt-Schuster, U. & Subkommission Tertiär-Stratigraphie (2018): The Tertiary in the Stratigraphic Table of Germany 2016 (STG 2016). Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, S. 267-294. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0152
- Járóka, T., Seifert, T., Pfänder, J. A., Staude, S., Seibel, H. V. L., Krause, J. & Bauer, M. E. (2019): Geology, sulfide mineralogy and petrogenesis of the Angstberg Ni-Cu-(PGE) sulfide mineralization (Lausitz Block, Bohemian Massif, Germany): A potential Ni-Cu exploration target in Central Europe? Ore Geology Reviews, Bd. 110, S. 102924. ISSN 0169-1368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.010>
- Jortzig, H. (2010): Verbreitung Rupel-Folge. In: G. u. R. B. Landesamt für Bergbau (Hrsg.): Atlas zur Geologie von Brandenburg. S. 62-63, Cottbus: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
- Käding, K.-C. (1975): Zechstein. In: M. Laemmlen (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25000 Blatt Nr. 5225 Geisa. 2. Aufl., S. 30-44, Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Käding, K.-C. (2005a): Bromprofile aus dem Zechstein - ein Beitrag zur Zyklustratigraphie. In: R. d. Kalivereins (Hrsg.): Kali und Steinsalz. Bd. 3, S. 31-43, Kassel: Kaliverein e.V. ISBN 1614-1210

- Käding, K.-C. (2005b): Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. Newsletters on Stratigraphy, Bd. 41, S. 123-127. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0123
- Kalt, A., Berger, A. & Blümel, P. (1999): Metamorphic Evolution of Cordierite-Bearing Migmatites from the Bayerische Wald (Variscan Belt, Germany). Journal of Petrology, Bd. 40, S. 601-627. ISSN 0022-3530. DOI: 10.1093/etroj/40.4.601
- Karpe, W. (2008): Kreide. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 244-266, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
- Katsube, T. J. & Connell, S. (1998): Shale permeability characteristics. Geological Survey of Canada, Current Research, Bd. 1998-E, S. 183-192. DOI: 10.4095/209964
- Katzung, G. (2004a): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern : mit 50 Tabellen. 1. Aufl., Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 351065210x
- Katzung, G. (2004b): Regionalgeologische Stellung und Entwicklung. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. Bd. 1. Auflage, S. 8-37, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 9783510652105
- Katzung, G., Feldrappe, H. & Obst, K. (2004): Kristallin des Osteuropäischen Kratons. In: G. Katzung, J. Maletz & H. Feldrappe (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 41-44, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3-510-65210-5
- Keller, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. Hannover: BGR. ISBN 9783981337334
- King, C. N. (2016): A revised correlation of Tertiary rocks in the British Isles and adjacent areas of NW Europe. Geological Society special report no. 27, Bath (UK): The Geological Society. ISBN 1-86239-728-7
- Kockel, F. (1995): Structural and Palaeogeographical Development of the German North Sea Sector. Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde, Stuttgart, Germany: Gebrüder Bornträger. ISBN 9783443110260
- Kockel, F. (1998): Salt Problems in Northwest Germany and the German North Sea Sector. Journal of seismic exploration, Bd. 7, S. 219-235
- Kockel, F. (1999): Die Bildung von Salzstrukturen in Norddeutschland – neue Einsichten, offene Fragen. Mitteilungen Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, Bd. 3, S. 38-47
- Kockel, F. & Krull, P. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands Untersuchung und Bewertung von von Salzformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover
- Kölbel, H. (1972): Dogger: Bathon. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura
- Kölbel, H. (1972a): Dogger: Aalen. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura
- Kölbel, H. (1972b): Dogger: Bajoc. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura

- Kölbel, H. (1972c): Dogger: Callov. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte des Jura
- Kopp, J., Bankwitz, P. & Köhler, R. (2001): Die Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) zwischen Saale und Neiße, Teil I: Geologisches Erscheinungsbild und basischer Magmatismus. Z. geol. Wiss., Bd. 29, S. 33-54
- Kossmat, F. (1927): Gliederung des varistischen Gebirgsbaues. Abhandlungen des Sächsischen Geologischen Landesamts, Leipzig / Dresden: G. A. Kaufmann's buchhandlung
- Kröner, A., Willner, A. P., Hegner, E., Frischbutter, A., Hofmann, J. & Bergner, R. (1995): Latest precambrian (Cadomian) zircon ages, Nd isotopic systematics and P-T evolution of granitoid orthogneisses of the Erzgebirge, Saxony and Czech Republic. Geologische Rundschau, Bd. 84, S. 437-456. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/BF00284512
- Kroner, U. (1995): Postkollisionale Extension am Nordrand der Böhmisches Masse: die Exhumierung des Sächsischen Granulitgebirges. 1. Aufl., Freiburger Forschungshefte / C, Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie. ISBN 3342005947; 9783342005940
- Kroner, U. & Görz, I. (2010): Variscan assembling of the Allochthonous Domain of the Saxo-Thuringian Zone - a tectonic model. In: U. Linnemann & R. L. Romer (Hrsg.): Pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia - From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen. S. 271-286, Stuttgart: Schweizerbart
- Kroner, U. & Romer, R. L. (2013): Two plates — Many subduction zones: The Variscan orogeny reconsidered. Gondwana Research, Bd. 24, S. 298-329. ISSN 1342-937X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.001>
- Krull, P. (2004): Epivariszisches Tafeldeckgebirge. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 388-397, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3-510-65210-5
- Krull, P., Hoth, P., Bräuer, V. & Wirth, H. (2004): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen: Zwischenbericht. Berlin / Hannover: BGR
- Kuhlemann, J. & Kempf, O. (2002): Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. Sedimentary Geology, Bd. 152, S. 45-78. ISSN 0037-0738. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00285-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00285-8)
- Kuhn, W. (2001): Pfälzer Wald, Haardt – Teil der MKZ. In: Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil II: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg. Bd. 234, S. 236, Courier Forschungsinstitut Senckenberg, CFS, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 3-510-61332-5
- Kupfahl, H.-G. (1965): Erläuterung zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000. Blatt 5323 Schlitz. Hessisches Landesamt für Bodenforschung. Wiesbaden
- Ladage, S., Andruleit, H., Babies, H. G., Bahr, A., Biermann, S., Blumenberg, M., Bönnemann, C., Burkhardt, B., Ceranna, L., Dohrmann, R., Erbacher, J., Franke, D., Gestermann, N., Helm, C., Himmelsbach, T., Houben, G., Illing, C. h., Kaufhold, S., Kosinowski, M., Kus, J., Gang, L., Lutz, R., Ostertag-Henning, C., Pfunt, H., Pletsch, T., Schlömer, S., Stück, H. L., Taranczewski, J. T., Ufer, K. & Zink, K.-G. (2016): Schieferöl und Schiefergas in Deutschland: Potenziale und Umweltaspekte. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Landesamt für Bergbau Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) (2014): Stratigraphie Brandenburg 2014. Geowissenschaftliche Beiträge 1/2 2014. [Webpage]. Brandenburg: LBGR. Letzte Aktualisierung am: 24.07.2014. Zugriff am: 10.09.2020. https://lbgr.brandenburg.de/media_fast/4055/1-2_14_Stratigraphie_2014.pdf
- Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau (2016): Symbolschlüssel Geologie Baden-Württemberg - Verzeichnis Geologischer Einheiten (aktualisierte Ausgabe 2016). Freiburg: Hrsg. vom Regierungspräsidium Freiburg
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (2005): Jura. In: K. Steingötter (Hrsg.): Geologie von Rheinland-Pfalz: mit 36 Tabellen. S. 400, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3510652150
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB-RLP) (2005): Oberkarbon und Rotliegend. In: J. Boy & K. Steingötter (Hrsg.): Geologie von Rheinland-Pfalz. S. 400, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65215-0
- Legler, B. (2006): Faziesentwicklung im Südlichen Permbecken in Abhängigkeit von Tektonik, eustatischen Meeresspiegelschwankungen des Proto-Atlantiks und Klimavariabilität (Oberrotliegend, Nordwesteuropa). Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft fuer Geowissenschaften, o.O.: DGGV Verlag. ISBN 978-3-932537-43-1
- Lepper, J., Rambow, D. & Röhling, H.-G. (2013): Lithostratigraphie des Buntsandstein in Deutschland. In: J. Lepper & H.-G. Röhling (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. Bd. 69, S. 69-149, Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. ISBN 978-3-510-49229-9
- Linnemann, U., Gerdes, A., Drost, K., Buschmann, B., Linnemann, U., Nance, R. D., Kraft, P. & Zulauf, G. (2007): The continuum between Cadomian orogenesis and opening of the Rheic Ocean: Constraints from LA-ICP-MS U-Pb zircon dating and analysis of plate-tectonic setting (Saxo-Thuringian zone, northeastern Bohemian Massif, Germany). In: The Evolution of the Rheic Ocean: From Avalonian-Cadomian Active Margin to Alleghenian-Variscan Collision. Bd. 423, S. 0: Geological Society of America. ISBN 9780813724232. DOI: 10.1130/2007.2423(03)
- Lott, G. K., Wong, T. E., Duser, M., Andsbjerg, J., Mönnig, E., Feldman-Olszewska, A. & Verreussel, R. M. C. H. (2010): Jurassic. In: J. C. Doornenbal & A. G. Stevenson (Hrsg.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. S. 175-193, Houten: EAGE Publications. ISBN 9073781612
- Manhenke, V., Reutter, E., Hübschmann, M., Limberg, A., Lückstädt, M., Nommensen, B., Peters, A., Schlimm, W., Taug, R. & Voigt, H.-J. (2001): Hydrostratigrafische Gliederung des nord- und mitteldeutschen känozoischen Lockergesteinsgebietes. Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 47, S. 146-152
- Martin-Gombojav, N. (2003): Petrographie und Petrogenese des Eckergneis-Komplexes, Harz. Dissertation, Universität Hamburg Geowissenschaften S. 173, Hamburg,
- Mayrhofer, H. (1967): Zechstein. In: M. Laemmlen (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000 Blatt Nr: 5124 Bad Hersfeld. S. 28-33, Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Maystrenko, Y., Bayer, U. & Scheck-Wenderoth, M. (2005): Structure and evolution of the Glueckstadt Graben due to salt movements. International Journal of Earth

- Sciences, Bd. 94, S. 799-814. ISSN 1437-3262. DOI: 10.1007/s00531-005-0003-4
- Maystrenko, Y., Bayer, U. & Scheck-Wenderoth, M. (2006): 3D reconstruction of salt movements within the deepest post-Permian structure of the Central European Basin System - the Glueckstadt Graben. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, Bd. 85, S. 181-196. ISSN 0016-7746. DOI: 10.1017/S0016774600021466
- Maystrenko, Y. P., Bayer, U., Brink, H.-J. & Littke, R. (2008): The Central European Basin System – an Overview. In: R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski & S. Nelskamp (Hrsg.): *Dynamics of Complex Intracontinental Basins - The Central European Basin System*. S. 18-34, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-85085-4. DOI: 10.1007/978-3-540-85085-4
- Mazur, S., Scheck-Wenderoth, M. & Krzywiec, P. (2005): Different modes of the Late Cretaceous–Early Tertiary inversion in the North German and Polish basins. *International Journal of Earth Sciences*, Bd. 94, S. 782-798. ISSN 1437-3262. DOI: 10.1007/s00531-005-0016-z
- Merklein-Lempp, I. (1985): Ursachen und Mechanismen des Trocknungs-Befeuchtungs-Zerfalls überkonsolidierter Pelite. In: K.-H. Heitfeld (Hrsg.): *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*. S. 59-74, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-70452-9. DOI: 10.1007/978-3-642-70452-9_4
- Meschede, M. (2018): *Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz*. 2. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662564226
- Meyer, R. K. F. (2000): Außeralpine Kreide in Süddeutschland (Regenburger Kreide). In: M. Hiß & J. Mutterlose (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland*. Bd. 226, S. 141 - 147, Frankfurt a. M.: Courier Forschungsinstitut Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Meyer, R. K. F. & Schmidt-Kaler, H. (1996): Jura. In: W. Freudenberger & K. Schwerd (Hrsg.): *Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000*. 4. neubearbeitete Auflage. Aufl., S. 90-102, München: Bayerisches Geologisches Landesamt
- Mönnig, E. (2006): Ornatenton-Formation - Record Nr. 4012001. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR Letzte Aktualisierung am: 19.10.2015. Zugriff am: 03.09.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012001>
- Mönnig, E. (2008): Northern Germany. In: G. Pieńkowski & M. E. Schudack (Hrsg.): *Jurassic*. Bd. 2, S. 823-922, London: Geological Society of London. ISBN 9781862392656. DOI: 10.1144/cev2p.2
- Mönnig, E. (2012a): Aspidoideston-Formation - Record Nr. 4012030. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 09.01.2013. Zugriff am: 03.09.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012030>
- Mönnig, E. (2012b): Württembergicatton-Formation - Record Nr. 4012033. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 09.01.2013. Zugriff am: 03.09.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012033>
- Mönnig, E. (2014): Ludwigionton-Formation - Record Nr. 4012042. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 02.01.2015. Zugriff am: 03.09.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012042>

- Mönnig, E. (2015a): Coronatenton-Formation - Record Nr. 4012040. [Litholex Online Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 02.01.2015. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012040>
- Mönnig, E. (2015b): Garantianton-Formation - Record Nr. 4012036. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR Letzte Aktualisierung am: 02.01.2015. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012036>
- Mönnig, E. (2015c): Parkinsonienton-Formation - Record Nr. 4012043. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR Letzte Aktualisierung am: 02.01.2015. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012043>
- Mönnig, E. (2015d): Sonninenton-Formation - Record Nr. 4012046. [Litholex Online Datenbank]. Hannover: BGR Letzte Aktualisierung am: 02.01.2015. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012046>
- Mönnig, E., Franz, M. & Schweigert, G. (2018): The Stratigraphic Chart of Germany (STD 2016): Jurassic. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, S. 225-246. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0148
- Mönnig, E., Nitsch, E. & Arp, G. (2015a): Amaltheenton-Formation - Record Nr. 4012097. [LithoLex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 19.10.2015. Zugriff am: 09.09.2020. <https://litholex.bgr.de/>
- Mönnig, E., Nitsch, E. & Arp, G. (2015b): Posidonienschiefer-Formation - Record Nr. 4012098. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 19.10.2015. Zugriff am: 03.09.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012098>
- Mönnig, E., Nitsch, E., Arp, G. & Bloos, G. (2015c): Obtususton-Formation - Record Nr. 4012099. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 19.10.2015. Zugriff am: 03.09.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012099>
- Müller, C., Jähne-Klingberg, F., von Goerne, G., Binot, F. & Röhling, H.-G. (2016): Vom Geotektonischen Atlas („Kockel-Atlas“) zu einem 3D-Gesamtmodell des Norddeutschen Beckens: Basisinformationen zum tieferen Untergrund von Norddeutschland. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 126, S. 65-106. DOI: 10.1127/zdgg/2016/0072
- Müller, U. & Obst, K. (2008): Junge halokinetische Bewegungen im Bereich der Salzkissen Schlieven und Marnitz in Südwest-Mecklenburg. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Bd. 15, S. 147-154
- Musstow, R. (1976a): Oberkreide: Cenoman bis Maastricht. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR
- Musstow, R. (1976b): Oberkreide: Coniac und Santon. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR
- Musstow, R. (1976c): Oberkreide: Turon. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR
- Mutterlose, J. (2000a): 4.3.1 Unterkreide im Niedersächsischen Becken. In: S. K. Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III: Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland. Bd. 226, S. 207, Frankfurt am Main: Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft (CFS). ISBN 3-922907-68-2
- Mutterlose, J. (2000b): Niedersachsen und angrenzende Gebiete : Unterkreide im Niedersächsischen Becken. In: Deutsche Stratigraphische Kommission, M. Hiß & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III – Die Kreide der

- Bundesrepublik Deutschland (Courier Forschungsinstitut Senckenberg, Bd. 226). S. 79-101, Frankfurt a. M.: Deutsche Stratigraphische Kommission. ISBN 3-929907-68-2
- Mutterlose, J. (2000c): Niedersachsen und angrenzende Gebiete: Unterkreide im Niedersächsischen Becken. In: M. Hiß & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland., S. 79-101, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 3-929907-68-2
- Mutterlose, J. (2000d): Unterkreide im Niedersächsischen Becken. In: M. Hiß & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland. Bd. 226, S. 207, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- NAGRA (2002): Project Opalinus Clay – Safety Report. „Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (En-tsorgungsnachweis)“. NAGRA. Wettingen/Schweiz
- Neuzil, C. E. (1994): How permeable are clays and shales? Water Resources Research, Bd. 30, S. 145-150. ISSN 0043-1397. DOI: 10.1029/93wr02930
- Niebuhr, B., Wood, C. J. & Ernst, G. (2000): Isolierte Oberkreide-Vorkommen zwischen Wiehengebirge und Harz. In: M. Hiß & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland., S. 101-109, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Nitsch, E., Arp, G. & Mönnig, E. (2015): Jurensismergel-Formation - Record Nr. 4012084. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 19.10.2015. Zugriff am: 03.09.2020.
<https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012084>
- Nitsch, E., Barnasch, J., Dittrich, D., Farrenschon, J., Franz, M. & Heunisch, C. (2011a): Exter-Formation - Record Nr. 5000006. [Litholex Online Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 16.02.2011. Zugriff am: 27.08.2020.
<https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=5000006>
- Nitsch, E., Barnasch, J., Dittrich, D., Farrenschon, J., Franz, M. & Heunisch, C. (2011b): Grabfeld-Formation - Record Nr. 5000002. [Litholex Online Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 16.02.2011. Zugriff am: 27.08.2020.
<https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=5000002>
- Nitsch, E., Barnasch, J., Dittrich, D., Farrenschon, J., Franz, M. & Heunisch, C. (2011c): Weser-Formation - Record Nr. 5000004. [Litholex Online Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 16.02.2011. Zugriff am: 27.07.2020.
<https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=5000004>
- Paul, J., Wemmer, K. & Ahrendt, H. (2008): Provenance of siliciclastic sediments (Permian to Jurassic) in the Central European Basin [Herkunftsgebiete siliziklastischer Gesteine (Perm bis Jura) des Germanischen Beckens]. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 159, S. 641-650. ISSN 18601804. DOI: 10.1127/1860-1804/2008/0159-0641
- Perm-Trias Subkommission der deutschen stratigraphischen kommission (2016): Anträge und Beschlüsse zur stratigraphischen Nomenklatur und Klassifikation [Internet Site]: Perm-Trias Subkommission der deutschen stratigraphischen kommission. Zugriff am: 18.08.2020. <http://www.stratigraphie.de/perm-trias/beschluss.pdf>

- Perner, M. (2018): Evolution of Palaeoenvironment, Kerogen Composition and Thermal History in the Cenozoic of the Northern Upper Rhine Graben, SW-Germany. Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, S. 222, Heidelberg,
- Petzka, M., Rusbült, J. & Reich, M. (2004): Jura. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 151-162, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652105
- Plein, E. & Van Adrichem Boogaert, A. (1995): Stratigraphie von Deutschland. 1. Rotliegend-Monographie, Teil 2: Norddeutsches Rotliegendbecken. Frankfurt am Main: Senckenbergische Naturforschende Ges. ISBN 3929907240
- Pollok, L., Hölzner, M. & Fleig, S. (2016): AP 2 – Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung. In: Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft). Sachbericht 03ESP323B. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Puff, P. & Radzinski, K.-H. (2013): Der Bundsandstein in der Thüringischen Senke. In: J. Lepper & H.-G. Röhling (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI - Buntsandstein. Bd. 69, S. 421-448, Stuttgart: Schweizerbart
- Radzinski, K.-H. (2008a): Zechstein. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 160-178, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
- Radzinski, K. H. (2008b): Buntsandstein. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 180-200, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
- Reich, M. (2000): Oberkreide. In: M. Hiß & M. J. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III, Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland., S. 119-123, Frankfurt a.M.: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Reinhardt, S., Bebiolka, A. C. & Weitkamp, A. (2017): Pleistozäne übertiefte Strukturen in Süddeutschland. Pleistozäne übertiefte Strukturen und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte in Süddeutschland. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin
- Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland: Zwischenbericht. Stand: 10.12.2014. Aufl., Hannover: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe
- Reinhold, K., Jahn, S., Kühnlenz, T., Ptock, L. & Sönke, J. (2013): F+E Endlagerung - Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW Endlagerstandort im Tonstein (AnSichT) - Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. Zwischenbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands: geologische Karte. 1:500000. Berlin: BGR.
- Reinhold, K., Müller, C. & Riesenberger, C. (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland: Synthese. In: C. Müller & K. Reinhold (Hrsg.): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland: eine

- Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland); Abschlussbericht; FZK 0327765. S. Seite 1 - 133 + 1 CD-ROM, Berlin: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe
- Reinhold, K., Stark, L., Kühnlenz, T. & Ptock, L. (2016): Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT), Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. Ergebnisbericht 9Y3207000000. BGR. Hannover
- Richter-Bernburg, G. (1955): Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 105, S. 843-854
- Röhling, H.-G. (1991): A lithostratigraphic subdivision of the Lower Triassic in the Northwest German Lowlands and the German sector of the North Sea, based on gamma-ray and sonic logs. Geologisches Jahrbuch. Reihe A: Allgemeine und regionale Geologie BR Deutschland und Nachbargebiete, Bd. 119, S. Seite 3 - 24. ISSN 978-3-510-96377-5
- Röhling, H.-G. (2015): Buntsandstein. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. S. 147-178, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
- Röhling, H.-G. & Lepper, J. (2013): Paläogeographie des Mitteleuropäischen Beckens während der tieferen Trias (Buntsandstein). In: J. Lepper & H.-G. Röhling (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI - Buntsandstein. Bd. 69, S. 43-68, Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. ISBN 978-3510492299
- Röhling, H.-G., Lepper, J., Diehl, M., Dittrich, D., Freudenberger, W., Friedlein, V., Hug-Diegel, N. & Nitsch, E. (2018): Der Buntsandstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften: ZDGG, Bd. 169, S. Seite 151-180. DOI: <https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0132>
- Röhling, S. (2002): Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zylo- und Sequenzstratigraphie. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät, S. 199, Halle-Saale, 05.07.2002
- Romer, R. L. & Rötzler, J. (2001): P–T–t Evolution of Ultrahigh-Temperature Granulites from the Saxon Granulite Massif, Germany. Part II: Geochronology. Journal of Petrology, Bd. 42, S. 2015-2032. ISSN 0022-3530
- Romer, R. L., Thomas, R., Stein, H. J. & Rhede, D. (2007): Dating multiply overprinted Sn-mineralized granites - examples from the Erzgebirge, Germany. Mineralium Deposita, Bd. 42, S. 337-359. ISSN 1432-1866. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0114-2>
- Roth, H. (1967): Zechstein. In: R. Motzka & M. Laemmlen (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt Nr. 5224 - Eiterfeld. S. 17-19, Wiesbaden, Deutschland: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Roth, H. & Laemmlen, M. (1970): Zechstein. In: M. Laemmlen (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt Nr. 5523 - Neuhof. S. 21-31, Wiesbaden, Deutschland: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Rothe, P. (2019): Die Geologie Deutschlands: 48 Landschaften im Portrait. "5., erweiterte und aktualisierte Auflage, Jubiläumsausgabe". Aufl., Darmstadt: wbv Academic ISBN 978-3-534-25377-7

- Rötzler, J. & Romer, R. L. (2001): P–T–t Evolution of Ultrahigh-Temperature Granulites from the Saxon Granulite Massif, Germany. Part I: Petrology. *Journal of Petrology*, Bd. 42, S. 1995-2013. ISSN 0022-3530. DOI: 10.1093/petrology/42.11.1995
- Rötzler, K. & Plessen, B. (2010): The Erzgebirge: a pile of ultrahigh- to low-pressure nappes of Early Palaeozoic rocks and their Cadomian basement. In: U. Linnemann & R. L. Romer (Hrsg.): *Pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia - From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen*. S. 253 - 270, Stuttgart: Schweizerbart
- Rupf, I. & Nitsch, E. (2008): *Das geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse*. Stand: August 2007. Aufl., LGRB-Informationen, 21, Freiburg: Landesamt f. Geologie, Rohstoffe u. Bergbau
- Schad, A. (1947): *Neue stratigraphische Ergebnisse im nordwestdeutschen Tertiär*. Berichte der Naturhistorischen Gesellschaft Hannover 1900-1947. Hannover
- Schäfer, I. (2016): *Stockwerksbau - Aufbau geologischer Einheiten* -. In: I. Schäfer (Hrsg.): *2. Willicher Praxistage Geothermie*, 29. - 30.09.2016. Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen
- Schäfer, P. (2012): *Mainzer Becken. Stratigraphie - Paläontologie - Exkursionen*. Sammlung geologischer Führer. Aufl., Bonn: Gebrüder Borntraeger. ISBN 978-3-443-15092-1
- Scheck-Wenderoth, M., Maystrenko, Y., Hübscher, C., Hansen, M. & Mazur, S. (2008): Salt Dynamics. In: R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski & S. Nelskamp (Hrsg.): *Dynamics of Salt Basins*. S. 307-322, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-85085-4. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85085-4_5
- Scheck, M., Bayer, U. & Lewerenz, B. (2003): Salt movements in the Northeast German Basin and its relation to major post-Permian tectonic phases - results from 3D structural modelling, backstripping and reflection seismic data. *Tectonophysics*, Bd. 361, S. 277-299. ISSN 0040-1951. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00650-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00650-9)
- Schilling, M., Simon, A., Jahnke, C. & Höding, T. (2018): *Brandenburg 3D – Das geologische 3D Modell Brandenburgs im Internet veröffentlicht*. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Bd. 25, S. 39-46
- Schmidt, R. (1996): *Feinstratigraphie des Opalinuston (Dogger [alpha]) der mittleren Schwäbischen Alb, Baden-Württemberg*. Dissertation, University of Tübingen, Tübingen,
- Scholtz, H. (1930): *Das varistische Bewegungsbild*. Fortschr. Geol. Paläont., Bd. 25, S. 235-316
- Schönfeld, J., Schulz, M.-G. & Spaeth, C. (2000): *Schleswig-Holstein und nördliches Niedersachsen*. In: M. Hiß & J. Mutterlose (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland*., S. 65-69, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Schott, W. (1969): *Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa*. Hannover: Bundesanstalt für Bodenforschung

- Schröder, B., Ahrendt, H., Peterek, A. & Wemmer, K. (1997): Post-Variscan sedimentary record of the SW margin of the Bohemian massif: a review. *Geologische Rundschau*, Bd. 86, S. 178-184. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/s005310050129
- Schudack, M. & Tessin, R. (2015): Jura. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): *Geologie von Brandenburg*. S. 217-256, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65210-5
- Schumacher, M. E. (2002): Upper Rhine Graben: Role of preexisting structures during rift evolution. *Tectonics*, Bd. 21, S. 6-1-6-17. ISSN 02787407. DOI: 10.1029/2001tc900022
- Sebastian, U. (2013): *Die Geologie des Erzgebirges*. Berlin/Heidelberg: Springer Spektrum. ISBN 978-3-8274-2977-3. DOI: 10.1007/978-3-8274-2977-3
- Seibertz, E. (2000): Kreidezeitlicher Magmatismus in der Bundesrepublik Deutschland und seine stratigraphischen Daten. In: D. S. Kommission (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland*. Bd. 226, S. 162-165, Frankfurt a. M.: Courier Forschungsinstitut Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Seidel, G. (2003): *Geologie von Thüringen*. 2. Aufl., Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. ISBN 3-510-65205-3
- Seidel, G. (2013): Stratigraphie, Fazies und geologische Stellung des Zechsteins und der Trias Thüringens. *Beiträge zur Geologie von Thüringen*. Neue Folge, Bd. 20, S. 21 - 78
- Seifert, W., Kämpf, H. & Wasternack, J. (2000): Compositional variation in apatite, phlogopite and other accessory minerals of the ultramafic Delitzsch complex, Germany: implication for cooling history of carbonatites. *Lithos*, Bd. 53, S. 81-100. ISSN 0024-4937. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00010-4)
- Siebel, W., Shang, C. K. & Presser, V. (2010): Permo-Carboniferous magmatism in the Fichtelgebirge: dating the youngest intrusive pluse by U-Pb, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, Bd. 38, S. 85-98
- Siebel, W., Shang, C. K., Reitter, E., Rohrmüller, J. & Breiter, K. (2008): Two Distinctive Granite Suites in the SW Bohemian Massif and their Record of Emplacement: Constraints from Geochemistry and Zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Chronology. *Journal of Petrology*, Bd. 49, S. 1853-1872. ISSN 0022-3530. DOI: 10.1093/petrology/egn049
- Simon, T. (1988): Geologische und hydrogeologische Ergebnisse der neuen Solebohrung Bad Rappenau, Baden-Württemberg. In: LGRB (Hrsg.): *Jahresheft*. Bd. Band 30, S. 479 - 510, Freiburg: LGRB
- Sirocko, F. (2012): Kapitel 1: Geologische Grundlagen Kreide: 142 - 65 Mio. J.v.h. In., S. 88:
- Stackebrandt, W. (2010): *Atlas zur Geologie von Brandenburg*. 4. Aufl., Cottbus: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg ISBN 9783980815741
- Stackebrandt, W. & Franke, D. (2015): *Geologie von Brandenburg*. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652952
- Stackebrandt, W. & Lippstreu, L. (2010): Brandenburg – Landescharakter und geologischer Bau. In: W. Stackebrandt (Hrsg.): *Atlas zur Geologie von*

- Brandenburg. 4. Aufl., S. 10-17, Cottbus: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg. ISBN 9783980815741
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- Standke, G. (2008): Paläogeografie des älteren Tertiärs (Paleozän bis Untermiozän) im mitteldeutschen Raum. [To the paleogeographic situation of the older Tertiary (Paleocene to Lower Miocene) in Central Germany]. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 159, S. 81-103. DOI: 10.1127/1860-1804/2008/0159-0081
- Standke, G. (2015): Tertiär. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. S. 259-333, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
- Stapf, K. R. G. (1989): Biogene fluvio-lakustrine Sedimentation im Rotliegend des permokarbonen Saar-Nahe-Beckens (SW-Deutschland). Facies: international journal of paleontology, sedimentology and geology, Bd. 20, S. 169-198
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (1999): Baden-Württemberg 2000 Der NEUE Atlas für das ganze Land. 2. Aufl., Stuttgart: Selbstverlag. ISBN 3923292961
- Steding, S., Bürkner, G., Törzs, T. & Grabe, J. (2018): Zum besonderen Quellverhalten von Tarrastonen. Geotechnik, Bd. 41, S. 254-263. ISSN 0172-6145. DOI: 10.1002/gete.201800003
- Stein, E. (2001): Odenwald – Teil der MKZ. In: Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil II: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg. Bd. 234, S. 236, Courier Forschungsinstitut Senckenberg, CFS, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 3-510-61332-5
- Stephan, T., Kroner, U., Hahn, T., Hallas, P. & Heuse, T. (2016): Fold/cleavage relationships as indicator for late Variscan sinistral transpression at the Rheno-Hercynian–Saxo-Thuringian boundary zone, Central European Variscides Tectonophysics, Bd. 681, S. 250-262. ISSN 0040-1951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.005>.
- Stottmeister, L., Poblozki, P. v. & Reichenbach, W. (2008): Regionalgeologische Einheiten – Altmark-Fläming-Scholle. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 348-369, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
- Straub, E. W. (1962): Die Erdöl- und Erdgaslagerstätten in Hessen und Rheinhessen. Abhandlungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Bd. 4, S. 123-136
- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias
- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): Lias: Hettang + Untersinemur. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias

- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): Lias: Obersinemur + Carix. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias
- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): Lias: Domer. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias
- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): Lias: Toarc. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias
- Thomsen, C., Hese, F., Schaller, A., Lademann, K., Rosenbaum, S. & Liebsch-Dörschner, T. (2017): Verbundvorhaben „StörTief“ - Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung - Teilprojekt (AP 1.2) Erarbeitung eines geothermischen 3D-Strukturmodells für den Glückstadtgraben in Schleswig-Holstein Schlussbericht 0325623B Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein - Abteilung Geologie und Boden Hannover
- Thomsen, C. & Liebsch-Dörschner, T. (2014): Geologische Potenzialanalyse des tieferen Untergrundes Schleswig-Holstein - Beitrag zur Fortschreibung des Landesentwicklungsplanes mit den Nutzungspotenzialen: Tiefe Geothermie, Energiespeicherung in Salzkavernen Geologischer Dienst -Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holsteine. Flintbek
- Thüringer Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz (2014): Geologisches 3D-Modell „Thüringer Becken“ (WMS Dienst). [Online-Ressource]: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Zugriff am: 01-09-2020. <http://nibis.lbeg.de/cardoMap3/?th=1411>
- Tichomirowa, M., Käßner, A., Sperner, B., Lapp, M., Leonhardt, D., Linnemann, U., Münker, C., Ovtcharova, M., Pfänder, J. A., Schaltegger, U., Sergeev, S., von Quadt, A. & Whitehouse, M. (2019): Dating multiply overprinted granites: The effect of protracted magmatism and fluid flow on dating systems (zircon U-Pb: SHRIMP/SIMS, LA-ICP-MS, CA-ID-TIMS; and Rb–Sr, Ar–Ar) – Granites from the Western Erzgebirge (Bohemian Massif, Germany). *Chemical Geology*, Bd. 519, S. 11-38. ISSN 0009-2541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.04.024>
- Tichomirowa, M., Sergeev, S., Berger, H.-J. & Leonhardt, D. (2012): Inferring protoliths of high-grade metamorphic gneisses of the Erzgebirge using zirconology, geochemistry and comparison with lower-grade rocks from Lusatia (Saxothuringia, Germany). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Bd. 164, S. 375-396. ISSN 1432-0967. DOI: 10.1007/s00410-012-0742-8
- TNO - Geological Survey of the Netherlands (2010): SPBA GIS MAPS AND DATABASE. The Hague, The Netherlands: Netherlands Organisation for Applied Scientific Research
- Tomek, F., Žák, J., Svojtka, M., Finger, F. & Waitzinger, M. (2019): Emplacement dynamics of syn-collapse ring dikes: An example from the Altenberg-Teplice caldera, Bohemian Massif. *GSA Bulletin*, Bd. 131, S. 997-1016. ISSN 0016-7606. DOI: 10.1130/b35019.1
- Tröger, K.-A. (2011): Postvariszisches Deckgebirge: Kreide – Oberkreide. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.): *Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte*. 2. Aufl., S. 311-358, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65270-9

- Trusheim, F. (1960): Mechanism of Salt Migration in Northern Germany. AAPG bulletin, Bd. 44, S. 1519-1540. ISSN 0149-1423. DOI: 10.1306/0bda61ca-16bd-11d7-8645000102c1865d
- Trusheim, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510967391
- Unger, H. J. & Meyer, R. K. F. (1996): Kreide im Untergrund des Molassebeckens (Purbeck bis Campan). In: W. Freudenberger & K. Schwerd (Hrsg.): Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000. 4. neubearbeitete. Aufl., S. 329, München: Bayerisches Geologisches Landesamt
- Voigt, T. (2015): Kreide. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. S. 240-256, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
- Von Bülow, W. & Müller, S. (2004): Neogen. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 209-216, Stuttgart: E. Schweizerbart. ISBN 9783510652105
- von Eynatten, H., Dunkl, I., Brix, M., Hoffmann, V.-E., Raab, M., Thomson, S. N. & Kohn, B. (2019): Late Cretaceous exhumation and uplift of the Harz Mountains, Germany: a multi-method thermochronological approach. International Journal of Earth Sciences, Bd. 108, S. 2097-2111. ISSN 1437-3262. DOI: 10.1007/s00531-019-01751-5
- von Goerne, G., Fleig, S., Rokahr, R. & Donadei, S. (2016): Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). Archivstück Sachbericht 03ESP323B. BGR - Institut für Geotechnik (LUH) - KBB Underground Technologies. Hannover / Jülich
- von Quadt, A. (1993): The Saxonian Granulite Massif: new aspects from geochronological studies. Geologische Rundschau, Bd. 82, S. 516-530. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/BF00212414
- Walter, R. (2007): Geologie von Mitteleuropa. 7. Aufl., Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652259
- Warren, J. K. (2015): Evaporites: A Geological Compendium. 2. Aufl., Cham: Springer. ISBN 9783319135113
- Weitkamp, A. & Bebiolka, A. C. (2017): Subglaziale Rinnen - Darstellung und Bewertung des Kenntnisstandes. Pleistozäne übertiefte Strukturen und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte in Süddeutschland. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover
- Wenzel, T., Mertz, D. F., Oberhänsli, R., Becker, T. & Renne, P. R. (1997): Age, geodynamic setting, and mantle enrichment processes of a K-rich intrusion from the Meissen massif (northern Bohemian massif) and implications for related occurrences from the mid-European Hercynian. Geologische Rundschau, Bd. 86, S. 556-570. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/s005310050163
- Wieczorek, K., Behlau, J., Heemann, U., Masik, S., Raab, M., Mueller, C. & Simo, E. K. (2014): VIRTUS Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz. GRS-354. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE Technology GmbH, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung. ISBN 9783944161341

- Wirth, E. (1954): Die nördliche Verbreitungsgrenze des Unteroligozäns im Rheintalgraben und ihre wirtschaftliche Bedeutung. Notizblatt des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung zu Wiesbaden, Bd. 82, S. 168-189
- Wunderlich, J. & Zeh, A. (2001a): Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) im Abschnitt Thüringer Becken und Kyffhäuser. In: Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil II: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg. Bd. 234, S. 236, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 3-510-61332-5
- Wunderlich, J. & Zeh, A. (2001b): Ruhlaer Kristallin – Teil der MKZ. In: Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil II: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg. Bd. 234, S. 236, Courier Forschungsinstitut Senckenberg, CFS, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 3-510-61332-5
- Zagora, I. & Zagora, K. (2004): Zechstein. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 132-139, Stuttgart: E. Schweizerbart. ISBN 9783510652105
- Zech, J., Jeffreis, T. E., Faust, D., Ullrich, B. & Linnemann, U. (2010): U/Pb dating and geochemical characterization of the Brocken and the Ramberg Plutons, Harz Mountain, Germany. *Geologica Saxonica*, Bd. 56, S. 9-24
- Zeh, A. (1995): Die Druck-Temperatur-Deformations-Entwicklung des ruhlaer Kristallins (Mitteldeutsche Kristallinzone). Dissertation, Universität Würzburg, S. 254, Würzburg,
- Zeh, A. & Brätz, H. (2002): Timing of Late Carboniferous/Permian Granite and Granite Porphyry Intrusions in the Ruhla Crystalline Complex (Central Germany), New Constraints from SHRIMP and 207Pb/206Pb Single Zircon Dating. *Geochemistry (Chemie der Erde)*, Bd. 62, S. 303-316. ISSN 0009-2819. DOI: <https://doi.org/10.1078/0009-2819-00018>
- Zeh, A. & Will, T. M. (2008): The Mid-German Crystalline Zone. In: U. Linnemann & R. L. Romer (Hrsg.): From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen: The pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia (NE Bohemian Massif). Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. ISBN 978-3-510-65259-4
- Ziegler, M. A. (1989): North German Zechstein facies patterns in relation to their substrate. *Geologische Rundschau*, Bd. 78, S. 105-127. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/BF01988356
- Ziegler, P. A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. 2. Aufl., Den Haag: Shell Internationale Petroleum Maatschappij. ISBN 9789066441255
- Zimmermann, J., Franz, M., Heunisch, C., Luppold, F. W., Mönnig, E. & Wolfgramm, M. (2015): Sequence stratigraphic framework of the Lower and Middle Jurassic in the North German Basin: Epicontinental sequences controlled by Boreal cycles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Bd. 440, S. 395-416. ISSN 0031-0182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.08.045>
- Zulauf, G., Bues, C., Dörr, W. & Vejnar, Z. (2002): 10 km Minimum throw along the West Bohemian shear zone: Evidence for dramatic crustal thickening and high topography in the Bohemian Massif (European Variscides). *International Journal*

of Earth Sciences, Bd. 91, S. 850-864. ISSN 1437-3262. DOI:
<https://doi.org/10.1007/s00531-001-0250-y>

Schudack, M. & Tessin, R. (2015): Jura In: Stackebrandt, W. & Franke, D. (Hrsg.): Geologie von Brandenburg, S. 217-240.

Abb. 3.2.7-1: Heutige Verbreitung und Ausbildung von Ablagerungen des Lias (Unterjura) in Brandenburg, mit nördlicher und südlicher Profillinie
Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung des vorwiegend tonigen Hettangium bis Untersinemurium.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias. Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der am stärksten marin beeinflussten Sedimente im Obersinemur/Carix, Westgrenze der Verbreitung der Grünen Serie und Ostgrenze der Verbreitung des Posidonienschiefers.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): Lias: Hettang + Untersinemur. 1 : 500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): Lias: Obersinemur + Carix. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): Lias: Domer. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): Lias: Toarc. 1:500 000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias.

Entscheidungserhebliches Datum: Verbreitung der Gebiete mit mariner Sedimentation.

Quartärbasis

BGE (2020af): Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

Keller, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. Hannover: BGR. ISBN 9783981337334

Meschede, M. (2018): Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz. 2. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662564226

Reinhardt, S., Bebiolka, A. C. & Weitkamp, A. (2017): Pleistozäne übertiefte Strukturen in Süddeutschland. Pleistozäne übertiefte Strukturen und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte in Süddeutschland. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin

Stackebrandt, W. (2009): Subglacial channels of Northern Germany : a brief review. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 160, S. 203-210. ISSN 1860-1804

StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist

Weitkamp, A. & Bebiolka, A. C. (2017): Subglaziale Rinnen - Darstellung und Bewertung des Kenntnisstandes. Pleistozäne übertiefte Strukturen und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte in Süddeutschland. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine
T +49 05171 43-0
poststelle@bge.de
www.bge.de